

喷杆喷雾机旋翼悬浮式喷杆自动调平控制系统研究

周志艳^{1,2} 周铭杰^{1,3} 陈羽立^{1,4} 明锐⁵ 向颖^{1,4} 罗锡文^{1,6}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学广东省农业人工智能重点实验室, 广州 510642;
3. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室, 广州 510642;
4. 广东省农业航空应用工程技术研究中心, 广州 510642;
5. 闽江学院福建省信息处理与智能控制重点实验室, 福州 350108;
6. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 现有的大型喷杆喷雾机的喷杆大多采用传统桁架结构,随着喷杆长度的增加,配套机构、设计复杂度及整机质量相应增加,整机质量大,农田中行走的通过性差,陷车风险高;喷杆平衡控制难度加大,降低了整机的可靠性和便利性;特别是在水田喷施作业中,大型喷杆喷雾机的功能受到很大限制。本文提出了一种旋翼悬浮式喷杆,分别融合地面机械高续航、载重大和空中无人机作业灵活、受地形地貌限制小的优点,并设计了自动调平控制系统以实现喷雾机喷杆在喷施作业过程中保持水平姿态。分析了喷杆的受力情况,对自动调平控制系统进行了辨识和建模,采用“陀螺仪+激光雷达”进行双传感器融合控制的方式,开展了旋翼悬浮式喷杆自动调平控制算法的仿真试验、台架试验和田间试验。试验结果表明:采用双传感器融合的模糊PID控制算法优于单传感器的角度PID控制算法,可较好地避免出现失稳状态;在田间试验中,当喷杆进入稳定状态后,整根喷杆各点离地高度均值在1.4~1.5 m之间,标准差不大于0.102 7 m,具有较好的水平度;所采集的10个不同时刻喷杆各点高度均值的变异系数为1.40%,说明喷杆悬浮高度的稳定性较好。该研究验证了旋翼悬浮式喷杆作业方法的可行性。

关键词: 旋翼悬浮式喷杆; 喷杆喷雾机; 自动调平; PID控制; 模糊控制

中图分类号: S491 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)12-0070-10 **OSID:** 

Automatic Leveling Control System of Rotors Hovering Spray Boom Sprayer

ZHOU Zhiyan^{1,2} ZHOU Mingjie^{1,3} CHEN Yuli^{1,4} MING Rui⁵ XIANG Ying^{1,4} LUO Xiwen^{1,6}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural Artificial Intelligence (GDKL-AAI), South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China
3. Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Guangzhou 510642, China
4. Guangdong Engineering Research Center for Agricultural Aviation Application (ERCAAA), Guangzhou 510642, China
5. Fujian Provincial Key Laboratory of Information Processing and Intelligent Control, Minjiang University, Fuzhou 350108, China
6. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The spray boom of the existing large boom sprayer mostly adopts traditional truss structure. With the increase of spray boom length, the quality of the whole machine is increased accordingly, which is prone to the problem of car trap. At the same time, The balance control of spray boom is more difficult, which reduces the reliability and convenience of the whole machine. Especially in paddy field spraying operation, the function of large boom sprayer is greatly limited. Aiming at the problems of the spray boom in the traditional truss structure, a kind of rotors hovering spray boom was proposed. The advantages of high endurance of ground machinery, large load and flexible operation of unmanned aerial vehicles were combined. An automatic leveling control system was designed to keep the spray boom level

收稿日期: 2022-01-30 修回日期: 2022-05-10
基金项目: 岭南现代农业科学与技术广东省实验室科研项目(NT2021009)、广东省乡村振兴战略专项(2020KJ261)、广东省科技计划项目(2021B1212040009)和吉安市科技计划项目(20211-055316)
作者简介: 周志艳(1972—),男,教授,博士,主要从事农业航空应用技术研究,E-mail: zyzhou@scau.edu.cn
通信作者: 罗锡文(1945—),男,教授,中国工程院院士,主要从事农业工程技术研究,E-mail: xwluo@scau.edu.cn

during spraying operation. Firstly, the automatic leveling control system was identified and modeled. The research of automatic leveling control algorithm of rotors hovering spray boom was carried out by using the method of “gyroscope and lidar”. It included simulation test, bench test and field test. The experimental results showed that the fuzzy PID control algorithm based on the fusion of two sensors was better than the angle PID control algorithm based on the single sensor. It can avoid instability state better. In the field test, when the spray boom entered the stable state, the average height of each point above the ground of the whole spray boom was ranged from 1.4 m to 1.5 m, and the maximum standard deviation was 0.102 7 m. The variation coefficient of the mean height of each point of the spray boom collected at 10 different moments was 1.40%, indicating that the hovering height of the spray boom was stable. The research verified the feasibility of the rotors hovering spray boom and provided reference for the prototype development of the rotors hovering spray boom sprayer.

Key words: rotors hovering spray boom; boom sprayer; automatic adjustment; PID control; fuzzy control

0 引言

喷杆喷雾机是大田植保作业的主要机具之一。常见的喷杆喷雾机作业幅宽通常为 12 m 左右,随着农机化水平的提高,对高效率、智能化植保机械的需求不断增大^[1],增加喷杆长度提升作业幅宽是提高作业效率的主要手段。现有喷杆喷雾机的喷杆大多采用传统桁架结构,但随着喷杆长度的增加,配套机构、设计复杂度及整机质量也相应增加^[2-3]。

国内外现有大型喷杆喷雾机最大作业幅宽可达 44 m^[4],单机总质量达 10 t 左右,整机质量大,农田中行走的通过性差,陷车风险高,且能耗及压苗损失随之加大,作业成本上升;农田泥底层高低不平,喷杆易产生摆动,平衡控制难度加大,降低了整机的可靠性和便利性^[5-7]。特别是在小行距的作物(如水稻)喷施作业中,大型喷杆喷雾机的功能受到很大限制^[8]。

为进一步提升大型喷杆喷雾机的性能,国内外学者进行了大量的研究。韩红阳等^[9]采用尺寸优化法对机动式喷杆喷雾机机架进行了轻量化研究,使用优化设计软件 Optistruct 对机架进行轻量化设计,但尚未见实际应用试验的报道;陈晨等^[10]针对喷雾机喷杆结构动力学原始设计缺陷,提出了一种基于遗传算法的多变量优化方法来优化喷杆结构,但该结构在质量减轻的同时使得竖直方向上的振动位移响应量增大;TUDOSE 等^[11]通过提出的一种系统进化算法得到喷杆的最优几何结构模型,在满足要求的情况下减轻了喷杆质量,但尚未见在生产中进行验证试验和应用的报道。针对喷杆钟摆式主被动悬架系统存在的参数不确定性和控制精度低、稳定性差等问题,国内外一些研究人员开展了基于模型补偿的自适应鲁棒控制器的研究,提高了喷杆系统稳定性^[12-13];针对喷杆的振动问题,部分学者采用 PID 控制和模糊 PID 控制液压系统对喷杆进行主动抑振,但在实际应用中效果仍不理想^[14-15];

ANTHONIS 等^[16]对约翰迪尔喷雾机的双摆垂直悬挂系统进行了优化设计,通过最小化的目标函数得到最优阻尼器,但可靠性有待进一步验证。综上,目前的研究主要通过控制算法抑制喷杆振动以及优化桁架结构来提升整机性能,但由于桁架结构空间大、侧向刚度小等特点,当作业幅宽增加时,其固有的缺陷依然较难克服。

近年来,由于植保无人机具有体型小、作业灵活、地形地貌的限制少等特点,发展迅速,但植保无人机的续航和药液搭载能力有限,决定了无人机植保作业必须采用超低容量喷雾法,存在雾滴细易飘移、穿透力不够、雾滴沉积效果不够好等问题,是植保无人机飞防中难以攻克的问题。

针对上述问题,提出一种旋翼悬浮式喷杆(简称喷杆)作业方法,在喷杆上安装多个旋翼为喷杆提供升力,分别融合地面机械高续航、载重大和空中无人机作业灵活、受地形地貌限制小的优点,可简化复杂肿胀的桁架结构,减轻机体的整体自重,同时,旋翼下压风场能减小雾滴飘移造成的二次污染。为验证方案的可行性,采用“陀螺仪+激光雷达”进行双传感器融合控制的方式,开展旋翼悬浮式喷杆自动调平控制系统设计与试验,以期对旋翼悬浮式喷杆喷雾机的样机研制提供参考。

1 旋翼悬浮式喷杆工作原理

1.1 旋翼悬浮式喷杆喷雾机整机结构

旋翼悬浮式喷杆喷雾机结构简图如图 1 所示,主要包括转向舵机、电源、驱动电机、药液箱、药液雾化系统、整机主控系统、自动调平控制系统、协同控制系统等。

在喷雾机作业过程中,自动调平控制系统根据传感器检测的数据,实现喷杆自动调平。同时,车身向前运动,安装在喷杆上的协同控制系统与车身协同前进,从而带动喷杆一同向前运动。

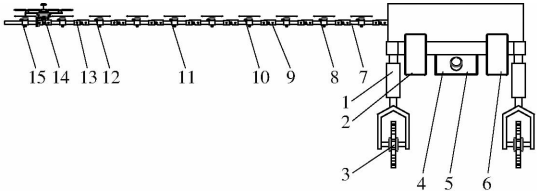


图1 旋翼悬浮式喷杆喷雾机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of rotors hovering spray boom sprayer

1.转向舵机 2.电源 3.驱动电机 4.药液箱 5.药液雾化系统 6.整机主控系统 7.自动调平控制系统 8.陀螺仪1 9.激光雷达1 10.陀螺仪2 11.陀螺仪3 12.陀螺仪4 13.激光雷达2 14.协同控制系统 15.陀螺仪5

1.2 自动调平控制系统组成及原理

喷杆自动调平控制系统主要由智能锂电池(14 s 欧荷牌,标称电压 51.8 V)、控制器(处理器为 STM32F103RCT6)、陀螺仪(MPU6050,深圳维特智能科技有限公司)、激光雷达(TFmini Plus,北醒光子科技有限公司)、无刷直流电机(泉鹰 EA60-170KV 型,中山泉鹰动力科技有限公司)、电调(泉鹰 EP-80A 型,中山泉鹰动力科技有限公司)及旋翼(T2055 型,中山泉鹰动力科技有限公司)等组成,喷杆通过方管铰接件与车身连接,如图 2 所示。方管铰接件分为左、右两个零部件,通过螺栓连接,使喷杆仅有一个绕 x 轴的转动副。左边的零部件通过螺栓固定在喷雾机车身上,右边的零部件与方管过盈配合,通过两侧的夹紧装置将方管夹紧。

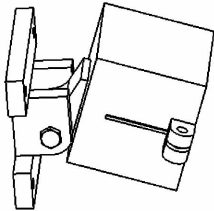


图2 方管铰接件

Fig.2 Square pipe hinge

自动调平控制系统的工作原理如图 3 所示,主要为:当旋翼悬浮式喷杆喷雾机在作业过程中发生车身倾斜时,喷杆与水平面之间的夹角会发生改变,同时喷杆距离作物冠层的高度也发生改变;安装在喷杆上的陀螺仪和激光雷达将测量到的数据发送给控制器,通过角度偏差和高度偏差,利用模糊控制算法融合相应位置的角度 PID 和高度 PID 输出量,调整 PWM(Pulse width modulation)信号占空比,进而控制无刷直流电机转速,带动旋翼产生使喷杆达到目标悬浮状态所需要的升力;当角度偏差和高度偏差均为零时,旋翼所提供的升力与喷杆自身重力大小相等,方向相反,此时整根喷杆保持水平,平行于作物冠层,实现喷杆自动调平。

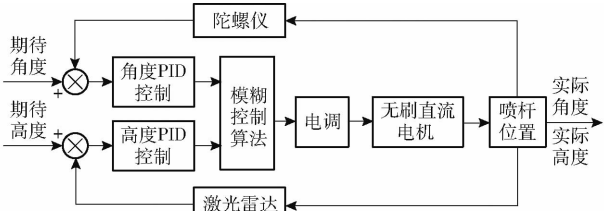


图3 自动调平控制系统原理图

Fig.3 Schematic of automatic leveling control system

1.3 旋翼悬浮式喷杆受力分析

喷杆由若干碳纤维方管(简称方管)、连接件、电机座、无刷直流电机、桨叶等组成。喷杆整体结构由 10 节 2 m 的方管组成,方管之间通过连接件连接;每个电机和桨叶通过电机座分别安装在各节方管的中点位置。相邻旋翼转动方向相反,当转速相同时,保证旋翼的反扭力两两相互抵消^[17],使喷杆不会绕 z 轴旋转。相邻方管的力矩分析图如图 4 所示。其中 O 为车身与第一节方管铰接处,A 为第 1、2 节方管的连接处; M_1 、 M_2 分别为第 1、2 节方管所受力矩。

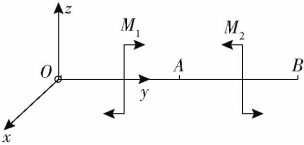


图4 相邻方管的力矩分析图

Fig.4 Torque analysis diagram of adjacent square tubes

喷杆的受力分析图可简化为图 5。其中 B、D、F、H 分别为第 2 和 3、4 和 5、6 和 7、8 和 9 节方管的连接处,J 为喷杆端部; F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 分别为第 1 和 2、3 和 4、5 和 6、7 和 8、9 和 10 号方管旋翼升力的合力。

在工作过程中,由于受到地面的随机干扰,容易使喷杆产生惯性,喷杆转动惯量与惯性力的计算公式为

$$J_{\omega} = \frac{ml^2}{3} \tag{1}$$

$$F_{\lambda} = \frac{mla}{2} \tag{2}$$

式中 J_{ω} ——转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
 F_{λ} ——惯性力, N
 m ——喷杆质量, kg
 l ——喷杆长度, m
 a ——角加速度, rad/s^2

根据试验测试得到作业喷杆长度、质量、角加速度,代入式(1)、(2)可得转动惯量为 $404.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,惯性力为 11.4 N,属于闭环控制的调节范围,可根据传感器数据变化调节电机转速,实现喷杆再次调平。因此,在分析闭环控制的过程中,可以忽略由地

面不平产生的随机扰动带来的影响。

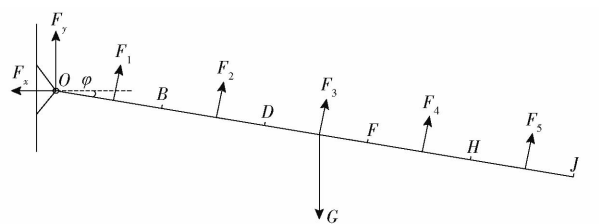


图 5 喷杆受力分析图

Fig. 5 Spray boom force analysis diagram

由图 5 可知

$$(F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5) \sin \varphi - F_x = 0 \quad (3)$$

$$(F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5) \cos \varphi + F_y - G = 0 \quad (4)$$

$$\left(\frac{1}{2}F_1 + \frac{3}{2}F_2 + \frac{5}{2}F_3 + \frac{7}{2}F_4 + \frac{9}{2}F_5 \right) \lambda - \frac{5}{2}GL \cos \varphi = 0 \quad (5)$$

式中 F_1 ——第 1 和 2 号方管旋翼升力的合力, N
 F_2 ——第 3 和 4 号方管旋翼升力的合力, N
 F_3 ——第 5 和 6 号方管旋翼升力的合力, N
 F_4 ——第 7 和 8 号方管旋翼升力的合力, N
 F_5 ——第 9 和 10 号方管旋翼升力的合力, N
 F_x ——车身对喷杆的横向力, N
 F_y ——车身对喷杆的轴向力, N
 G ——喷杆所受重力, N
 φ ——喷杆与水平面夹角, ($^\circ$)
 λ ——相邻两节方管长度, m

由上述分析可知, 该受力情况为超静定问题。

当 $F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F_5$ 时, $F_x = G \sin \varphi \cos \varphi$, $F_y = G \sin^2 \varphi$, $F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F_5 = \frac{1}{5} G \cos \varphi$ 。

2 自动调平控制系统辨识与建模

2.1 无刷直流电机模型

本文采用泉鹰 EA60-170KV 型无刷直流电机, 根据基尔霍夫定律^[18]可得电枢回路方程为

$$u_a = L \frac{di_a}{dt} + i_a R_a + e_a \quad (6)$$

$$\text{其中 } e_a = K_e n \quad (7)$$

式中 u_a ——电枢两端的输入电压, V

i_a ——电枢绕组电流, A

e_a ——电机反电动势, V

L ——电枢绕组电感, H

R_a ——电枢绕组电阻, Ω

K_e ——电机反电动势系数

n ——电机轴转速, r/s

为构建电机系统的完整数学模型, 除了电压方程, 还需引入转矩方程和电机运动方程

$$T_e - T_L = J \frac{dn}{dt} + B_v n \quad (8)$$

$$\text{其中 } T_e = K_T i_a \quad (9)$$

式中 J ——转子转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

T_e ——电磁转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

T_L ——负载转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

K_T ——电机转矩系数

B_v ——黏滞摩擦系数

由于泉鹰 EA60-170KV 型无刷直流电机为小型电机, 可以忽略黏滞摩擦系数 B_v 的影响。对式(6)、(8)作拉氏变换可得

$$\frac{i_a}{u_a - e_a} = \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + \frac{sL}{R_a}} \quad (10)$$

$$\frac{n}{T_e - T_L} = \frac{1}{sJ} \quad (11)$$

本文采用 PWM 信号调节电枢电压 u_a , 根据文献[19-20]可知, 忽略电路的延时, PWM 变换器可简化为

$$u_a = dK_a \quad (12)$$

式中 d ——PWM 信号占空比

K_a ——PWM 信号占空比与电枢电压转换系数

由式(7)、(9)、(11)、(12)可形成一个带负反馈的闭环二阶控制系统, 联立得出电机转速和 PWM 信号占空比的传递函数为

$$G(s) = \frac{n(s)}{d(s)} = \frac{\frac{K_a}{K_e}}{\frac{R_a J}{K_e K_T} \frac{L}{R_a} s^2 + \frac{R_a J}{K_e K_T} s + 1} \quad (13)$$

通过多组试验测得电机转速 n 与喷杆角度 θ 以及喷杆距冠层高度 h 之间的关系, 同时测得 PWM 信号占空比与电枢电压转换系数 K_a ; 根据电机数据手册, 得到该型号电机的相关参数^[21-23], 代入式(13)可得 PWM 信号占空比与喷杆角度 θ 和喷杆距冠层高度 h 的传递函数分别为

$$G_1(s) = \frac{1.36}{0.43s^2 + 0.015s + 0.001} \quad (14)$$

$$G_2(s) = \frac{1}{0.35s^2 + 0.012s + 0.001} \quad (15)$$

2.2 单传感器 PID 控制算法

传统的 PID 控制算法包括位置式和增量式两种, 本文采用增量式 PID 算法, 即数字控制器的输出由控制器的增量 Δu_k 组成, 离散的 PID 表达式为

$$d_k = K_p e_k + K_i \sum_{j=0}^k e_j + K_d (e_k - e_{k-1}) \quad (16)$$

$$\text{其中 } K_i = K_p \frac{T}{T_i} \quad (17)$$

$$K_d = K_p \frac{T_d}{T}$$

(18)

式中 d_k ——第 k 次采样时间输出的 PWM 信号占空比

K_p ——比例系数

K_i ——积分系数

K_d ——微分系数

e_k ——第 k 次采样偏差

T ——采样时间, s

T_i ——积分时间常数

T_d ——微分时间常数

由式(16)递推得增量式 PID 控制算法公式为

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1} =$$
$$K_p \left(e_k - e_{k-1} + \frac{T}{T_i} e_k + T_d \frac{e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}}{T} \right)$$

(19)

2.3 双传感器融合的模糊 PID 控制算法

由于旋翼悬浮式喷杆较长,工况较为复杂,不确定性较大,单一传感器 PID 控制较难满足响应速度、控制精度、抗干扰能力的要求。因此,利用模糊控制算法融合角度 PID 和高度 PID 的数据进行协调控制。模糊控制系统的核心是模糊控制器^[24-25]。以喷杆距冠层的高度偏差 E 和角度偏差变化率 E_c 作为输入,高度 PID 和角度 PID 的权重比系数 Q 作为输出。根据喷杆自动调平过程中激光雷达和陀螺仪输出的数据可知,喷杆距冠层的高度偏差为 $-0.3 \sim 0.3$ m,角度偏差变化率为 $-0.15 \sim 0.15$ ($^{\circ}$)/s。因此,设高度偏差 E 和角度偏差变化率 E_c 的基本论域分别为 $[-0.3, 0.3]$ m 和 $[-0.15, 0.15]$ ($^{\circ}$)/s; 输出量 Q 的基本论域为 $[0, 1]$ 。假设输入和输出对应的论域都是 $[-0.3, 0.3]$, 则高度偏差 E 和角度偏差变化率 E_c 的量子因子分别为 $K_E = 1$ 、 $K_{EC} = 2$; 输出量 Q 的量子因子为 $K_Q = 0.6$ 。模糊规则的模糊子集为 {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}, 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大; 输入输出的隶属度函数都采用三角形函数。根据模糊规则的一般设计原则^[26-28]以及大量的试验,得到 Q 的模糊控制规则如表 1 所示。本文模糊控制器去模糊化采用重心法^[29],通过各自的比例因子即可在线自整定权重比系数 Q ,从而调整 PWM 信号占空比来控制电机转速,实现喷杆快速达到平衡。

3 试验

3.1 试验方法

3.1.1 仿真试验

在 Matlab/Simulink 模块中建立仿真模型,整定 PID 控制最优参数,得到仿真响应曲线如图 6 所示,

表 1 模糊控制规则
Tab.1 Fuzzy control rule

E	E_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NS	PM	PB	PM	NS	NB
NM	NB	NM	PS	PB	PS	NM	NB
NS	NB	NM	ZE	PM	ZE	NM	NB
ZE	NB	NM	ZE	ZE	ZE	NM	NB
PS	NB	NM	ZE	PM	ZE	NM	NB
PM	NB	NM	PS	PB	PS	NM	NB
PB	NB	NS	PM	PB	PM	NS	NB

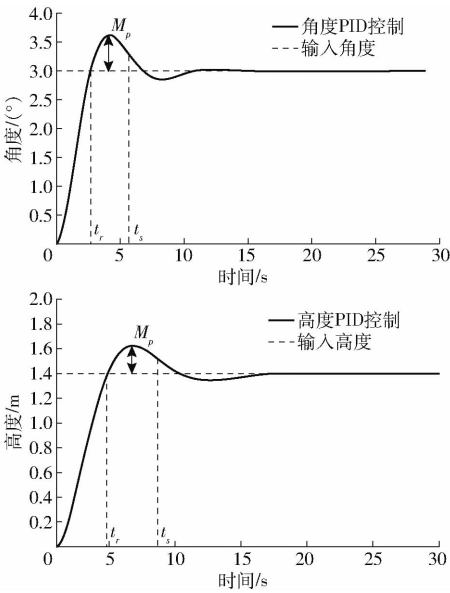


图 6 单传感器 PID 控制仿真结果

Fig.6 Simulation results of single sensor PID control

图中 t_r 为上升时间, t_s 为进入稳态的调节时间(由于喷杆较长,调试过程中各组 PID 控制之间相互产生干涉。因此, t_s 指从电机上电开始工作到喷杆相关的各被控制量的稳态误差在 $\pm 10\%$ 以内所用时间^[30]), M_p 为超调量;同时建立模糊控制规则表,验证模糊控制算法融合两种传感器数据的有效性。

3.1.2 两种控制算法台架试验对比

搭建 20 m 喷杆,进行 5 组角度 PID 控制算法和双传感器融合的模糊 PID 控制算法的台架对比试验,通过分析 5 个陀螺仪输出角度的响应曲线,验证 PID 整定参数的有效性;同时分析激光雷达输出高度的响应曲线,通过失稳时间(即喷杆进入稳态后再次离开稳态的时间)对比两种控制算法性能。

3.1.3 喷杆水平度和稳定性判定

为研究车身振动和自然风速对喷杆水平度和稳定性的影响,采用 5 个星光极 M1 运动相机记录喷杆稳定后喷杆 4、8、12、16、20 m 位置处的高度,每隔 1 s 记录一次,统计稳定后 10 个不同时刻喷杆各点的高度情况。通过分析同一时刻各点高度值的标准

差反映喷杆的水平度,分析 10 个不同时刻喷杆各点高度均值的变异系数反映喷杆的稳定性。

3.2 仿真试验

3.2.1 PID 控制参数整定

根据前文建立的无刷直流电机系统模型和所得到的传递函数,在 Matlab 的 Simulink 模块中建立 PID 控制系统的仿真模型^[31]。将喷杆初始位置的角度和高度分别作为输入量,仿真过程中输出的角度和高度作为反馈量,通过 PID 控制算法闭环控制无刷直流电机的转速。在实际控制的过程中,比例系数决定系统的响应速度, K_p 越大,响应速度越快,但超调量也会随之增大,过大的比例系数会导致系统不稳定;积分系数影响控制系统的精度, K_i 越大,控制精度越高,但会增加系统的振荡次数;微分系数影响调节时间,同时影响超调量。分别对角度 PID 和高度 PID 进行多次仿真测试,其中几组测试结果如表 2 所示。

表 2 PID 控制参数整定

Tab.2 PID control parameter settings

控制算法	$K_p/K_i/K_d$	上升时间	进入稳态的	超调量
		t_r/s	调节时间 t_s/s	M_p
角度 PID	0.2/0.000 3/0.15	2.79	8.74	0.97°
	0.2/0.000 3/0.2	3.52	5.84	0.66°
	0.3/0.000 3/0.2	2.45	7.51	0.85°
高度 PID	0.12/0.000 1/0.12	3.39	12.08	0.44 m
	0.12/0.000 1/0.18	4.91	8.77	0.22 m
	0.18/0.000 1/0.18	2.89	9.82	0.34 m

由表 2 可以看出,当角度 PID 和高度 PID 的控制参数 K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 0.2、0.000 3、0.2 和 0.12、0.000 1、0.18 时,进入稳态的调节时间较短,超调量较小,控制性能相对较好。

3.2.2 双传感器融合的模糊 PID 控制算法仿真分析

由于喷杆较长,实际测试过程中不确定因素较多,单独采用陀螺仪进行基于角度 PID 的喷杆

控制时,喷杆调节范围容易进入非调节区,造成喷杆失稳,将角度和高度两种传感器信息进行融合控制是解决角度 PID 控制进入非调节区的有效方法之一。

根据前文建立的模糊控制器,在 Matlab 的 Simulink 模块中建立双传感器融合的模糊 PID 控制算法仿真模型,如图 7 所示。将高度偏差 E 和角度偏差变化率 E_c 作为模糊控制器的输入量,两组 PID 控制的权重比系数 Q 作为模糊控制器的输出量,根据在 FUZZY Toolbox 中提前设计好的 FIS 系统实时调整 Q ^[32],确定各个阶段所需的最优权重系数。

仿真过程中,权重比系数 Q 根据模糊控制规则表进行实时调整,模糊控制曲面图如图 8 所示。从图 8 可以看出,当角度偏差变化率 E_c 较大时, Q 较小,即角度 PID 控制占比大;当角度偏差变化率 E_c 较小、高度偏差 E 较大时, Q 较大,即高度 PID 控制占比大。由此验证了模糊控制算法在融合两种单一传感器 PID 控制中的有效性。

3.3 台架试验

3.3.1 试验设计

喷杆自动调平控制系统台架试验于 2021 年 10 月 30 日在华南农业大学广东省农业航空应用工程技术研究中心进行。喷杆采用前述的自动调平控制系统进行控制,台架试验实物图如图 9 所示,关键部件局部图如图 10 所示。

MPU6050 型陀螺仪用于测量喷杆与水平面之间的角度,TFmini Plus 型激光雷达用于测量喷杆距地面的高度,与控制电路组成闭环控制系统。由于喷杆较长,在自然状态下会出现挠曲变形,因此利用 5 组角度 PID 控制算法对喷杆进行控制。在喷杆 3、7、11、15、19 m 位置各安装一个陀螺仪测量喷杆在该位置的角度,在 6 m 和 16 m 的位置各安装一个激光雷达测量喷杆高度,将测量值作为相应位置的反馈量。

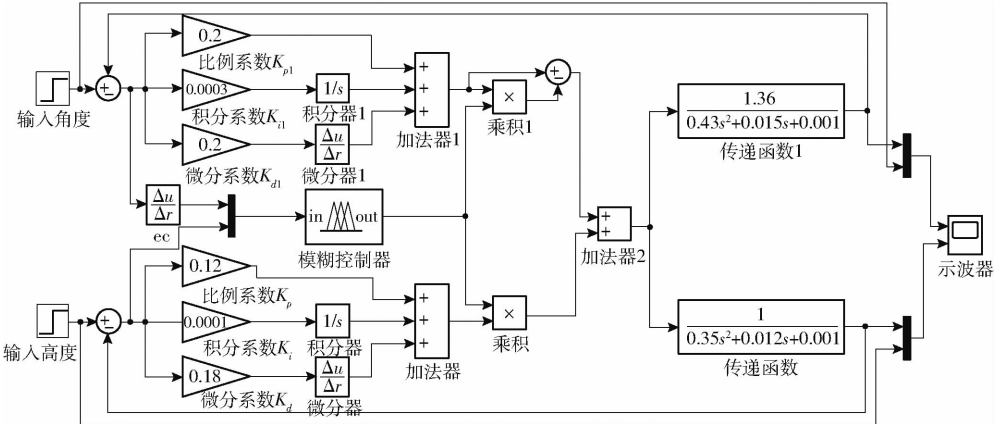


图 7 双传感器融合的模糊 PID 控制算法仿真模型

Fig.7 Simulation model of fuzzy PID control algorithm based on dual sensor fusion

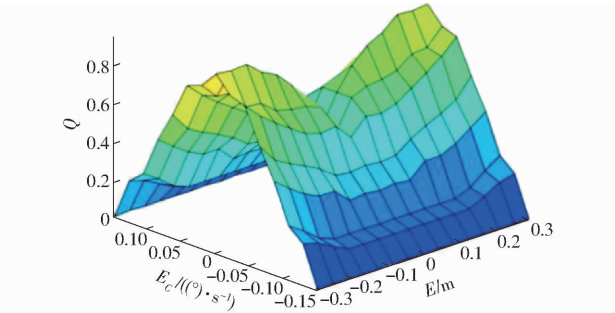


图8 模糊控制曲面图

Fig. 8 Fuzzy control surface diagram

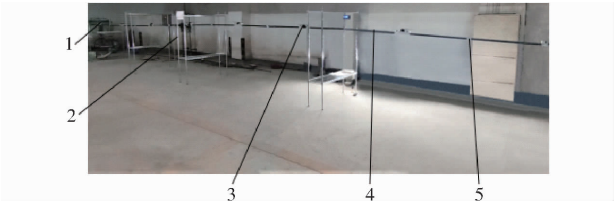


图9 自动调平控制系统台架试验

Fig. 9 Bench test of automatic leveling control system

1. 喷雾机车身 2. 安全台架 3. 无刷直流电机 4. 喷杆 5. 喷杆连接件

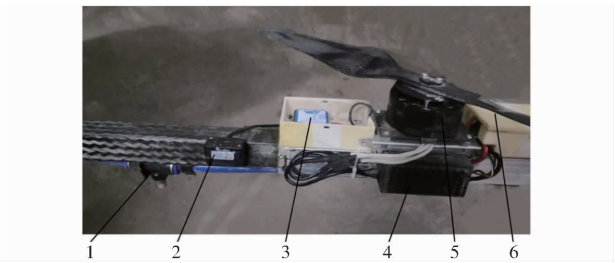


图10 关键部件局部图

Fig. 10 Local view of key components

1. 喷头 2. 激光雷达 3. 陀螺仪 4. 电调 5. 无刷直流电机 6. 桨叶

以喷杆初始位置的角度和高度作为初始量,喷杆水平位置的角度和高度作为目标量;陀螺仪和激光雷达测量值作为反馈量,利用模糊控制算法融合角度PID和高度PID的输出值,自动调节电子调速器输出PWM信号占空比;进而控制电机转速,实现喷杆系统自动调平。

试验过程中,分别对角度PID控制算法、双传感器融合的模糊PID控制算法进行对比试验。

3.3.2 试验结果与分析

电机开始转动时,利用串口助手XCOM每隔0.5 s记录陀螺仪和激光雷达输出的数据,分别得到两种不同控制算法的试验结果,如图11所示。选取前30 s的输出数据,把5个陀螺仪响应曲线的上升时间、进入稳态的调节时间、超调量取平均值进行分析,控制性能试验数据对比如表3所示。

由于20 m喷杆在调试过程中相互产生干涉等

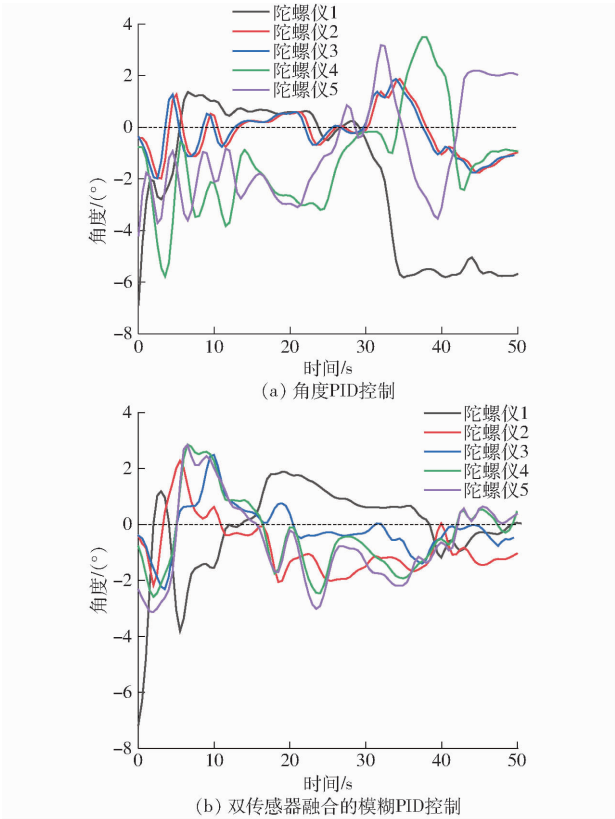


图11 两种控制算法试验输出的陀螺仪数据

Fig. 11 Gyroscope data output by two control algorithms

表3 控制性能试验数据对比

Tab. 3 Comparison of control performance test data

控制算法	上升时间/	进入稳态的调节	超调量/
	s	时间/s	(°)
角度PID控制	4.32	16.45	1.31
双传感器融合的模糊PID控制	4.14	14.18	2.32

不确定因素,表3中试验数据与仿真结果相比,两种控制算法的上升时间分别增加了0.8 s和0.62 s,进入稳态的调节时间分别增加了10.61 s和8.34 s,超调量分别增加了0.65°和1.66°,但总体趋势与仿真结果保持一致,验证了前述PID参数的有效性。

由于喷杆较长、不确定性因素较多,为进一步对比两种算法的性能,利用激光雷达输出的高度进行了自动调平控制的失稳时间对比。

从图12中可以看出,采用5组角度PID单独进行喷杆调平控制时,易出现控制死区,使得喷杆进入失稳状态,本次试验测得的失稳时间为31.86 s。采用双传感器融合的模糊PID控制算法进行喷杆调平控制时,模糊控制算法将高度PID与角度PID输出量融合,当角度传感器PID控制算法进入控制死区无法进行喷杆调节时,激光雷达的高度PID控制算法发挥作用,使角度PID控制算法脱离控制死区,避

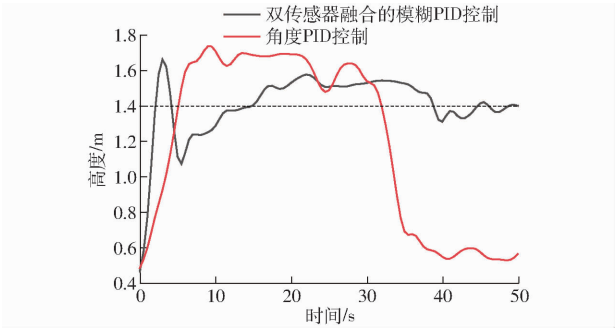


图 12 两种控制算法的失稳时间对比

Fig. 12 Comparison of instability time between two control algorithms

免出现图 12 自动调平控制失稳的状况。

3.4 田间试验

3.4.1 试验设计

为研究在自然风干扰和车身在高程上振动的影响下,喷杆自动调平控制算法的有效性,2022 年 1 月 5 日,在华南农业大学增城教学科研基地进行了旋翼悬浮式喷杆喷雾机喷杆自动调平控制算法的田间试验。试验期间,天气多云,空气湿度 69%,温度 9~19℃,东北风 2 级以下,试验现场如图 13 所示(由于喷杆较细长,原图背景复杂造成喷杆及测量工具不清晰,图 13a 进行了背景优化处理)。

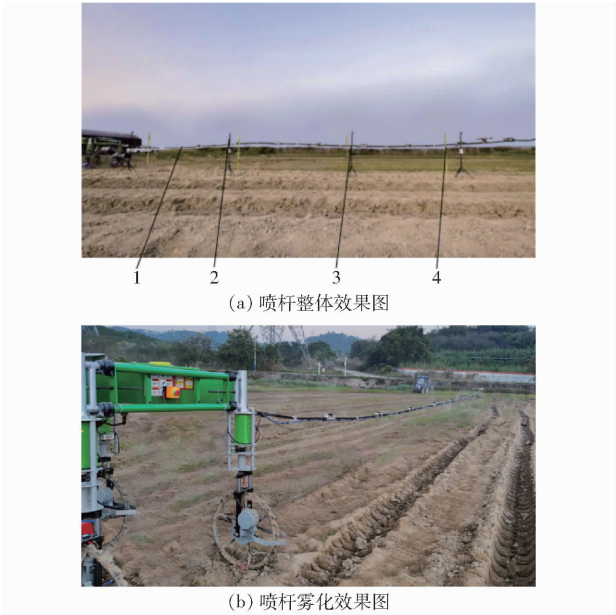


图 13 田间试验

Fig. 13 Field experiment

1. 喷杆 2. 运动相机 3. 三脚架 4. 标尺

试验采用课题组自制的旋翼悬浮式喷杆喷雾机样机,该样机以 3WP-100 型自走式喷杆喷雾机为应用平台,喷杆采用薄壁方形截面为 30 mm × 30 mm、壁厚为 1.5 mm 的方管。其他试验测量设备包括:星光极 M1 运动相机及三脚架(用于记录采样点喷杆动态的影像)、标尺(用于测量喷杆的动态真

实高度)等。
为记录喷杆自动调平控制时的动态活动情况,在喷杆 4、8、12、16、20 m 位置的正前方 5 m 处分别设立一根标尺,同时在这几个位置上相应放置三脚架,将星光极 M1 运动相机安装在三脚架上。调整三脚架高度,使其与车身和喷杆铰接点高度保持一致,保证喷杆自动调平后运动相机镜头平视喷杆,以便记录喷杆各方管的真实高度。

3.4.2 试验结果与分析

读取同一时刻各个运动相机影像中喷杆对应标尺的高度,每隔 1 s 获取一次,得到多个不同时刻喷杆实际高度折线图,如图 14 所示。

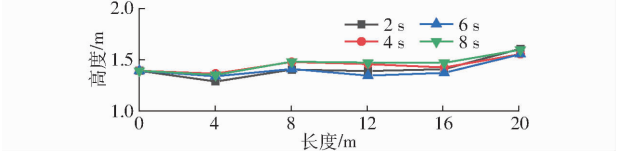


图 14 不同时刻喷杆实际高度对比曲线

Fig. 14 Actual height line chart of spray boom at different times

由表 4 可知,当喷杆进入稳定状态后,整根喷杆各点高度均值在 1.4~1.5 m 之间浮动,标准差最大为 0.102 7 m,具有较好的水平度;所采集的 10 个不同时刻喷杆各点高度均值的变异系数为 1.40%,说明喷杆悬浮高度的稳定性较好。但由于传感器自身的固有缺陷及田间作物冠层稀疏且高差变化大等原因,在进行多次田间试验的过程中,偶尔会出现控制过于灵敏而造成喷杆悬浮调整过度的情况。

表 4 20 m 喷杆各时刻高度

Tab. 4 Height of 20 m spray boom at each moment		
时刻/s	均值/m	标准差/m
1	1.450	0.088 3
2	1.421	0.102 7
3	1.450	0.072 5
4	1.447	0.069 5
5	1.414	0.073 2
6	1.409	0.079 1
7	1.466	0.085 5
8	1.468	0.083 8
9	1.432	0.095 6
10	1.438	0.094 3

4 结论

(1) 针对现有大型喷杆喷雾机喷杆桁架结构存在的不足,分别融合地面机械高续航、载重大和空中无人机作业灵活、不受地形地貌限制小的优点,提出了一种旋翼悬浮式喷杆。通过对喷杆结构的受力情况以及控制原理理论分析,设计了一套完整的喷杆

自动调平控制系统,并搭建了整机试验平台;采用“陀螺仪+激光雷达”进行双传感器融合控制的方式,实现闭环控制旋翼喷杆上各旋翼的转速,达到喷杆自动调平控制,保持水平状态。

(2)在 Matlab 的 Simulink 模块中分别对角度 PID 和高度 PID 进行参数整定,同时对设计的模糊控制器进行了仿真试验。对仿真参数进行台架试验验证,试验结果表明:采用双传感器融合的模糊 PID 控制算法优于单传感器的角度 PID 控制算法,可避

免出现失稳状态。

(3)对喷杆自动调平控制系统进行了田间试验验证。试验结果表明:当喷杆进入稳定状态后,整根喷杆各点离地高度均值在 1.4~1.5 m 之间,标准差不大于 0.102 7 m,具有较好的水平度;所采集的 10 个不同时刻喷杆各点高度均值的变异系数为 1.40%,说明喷杆悬浮高度的稳定性较好。本研究验证了旋翼悬浮式喷杆作业方法的可行性,可为旋翼悬浮式喷杆喷雾机的样机研制提供参考。

参 考 文 献

- [1] XING M M, LI X G, XUE K F, et al. Three-dimensional dynamics simulation analysis of high clearance sprayer with road excitation[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34(4): 1485–1493.
- [2] 崔龙飞,薛新宇,乐飞翔,等. 大型喷杆喷雾机钟摆式主被动悬架自适应鲁棒控制研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(12): 130–141.
CUI Longfei, XUE Xinyu, LE Feixiang, et al. Adaptive robust control of active and passive pendulum suspension for large boom sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(12): 130–141. (in Chinese)
- [3] 邢全道. 高地隙窄形橡胶履带轮水旱兼用宽幅植保施肥机的设计与性能试验[D]. 南京:南京农业大学, 2013.
XING Quandao. The design and performance test on height gap narrow-shaped rubber crawler and wide crop protection fertilization machine for dual-purpose in floods or droughts[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [4] 何雄奎. 中国植保机械与施药技术研究进展[J]. *农药学报*, 2019, 21(增刊1): 921–930.
HE Xiongkui. Research and development of crop protection machinery and chemical application technology in China[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2019, 21(Supp. 1): 921–930. (in Chinese)
- [5] 庄腾飞,杨学军,董祥,等. 大型自走式喷雾机喷杆研究现状及发展趋势分析[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(增刊): 189–198.
ZHUANG Tengfei, YANG Xuejun, DONG Xiang, et al. Research status and development trend of large self-propelled sprayer booms[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(Supp.): 189–198. (in Chinese)
- [6] 乔白羽,丁素明,薛新宇,等. 喷雾机喷杆结构的研究现状及展望[J]. *农机化研究*, 2017, 39(11): 246–250.
QIAO Baiyu, DING Suming, XUE Xinyu, et al. The research status and prospects on the structure of spray boom[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(11): 246–250. (in Chinese)
- [7] 袁守利,许烁. 基于灵敏度分析和评价方法的喷雾机机架轻量化设计[J]. *机械设计与研究*, 2017, 33(2): 108–112.
YUAN Shouli, XU Shuo. Lightweight design for frame for boom sprayer based on sensitivity analysis and evaluation methods[J]. *Machine Design & Research*, 2017, 33(2): 108–112. (in Chinese)
- [8] 周志艳,袁旺,陈盛德. 中国水稻植保机械现状与发展趋势[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(15): 178–183.
ZHOU Zhiyan, YUAN Wang, CHEN Shengde. Current status and future directions of rice plant protection machinery in China[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2014, 41(15): 178–183. (in Chinese)
- [9] 韩红阳,陈树人,邵景世,等. 机动式喷杆喷雾机机架的轻量化设计[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 47–53.
HAN Hongyang, CHEN Shuren, SHAO Jingshi, et al. Lightweight design of chassis frame for motor boom sprayer[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(3): 47–53. (in Chinese)
- [10] 陈晨,薛新宇,顾伟,等. 喷雾机喷杆结构形状及截面尺寸优化与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 50–56.
CHEN Chen, XUE Xinyu, GU Wei, et al. Experiment and structure shape and section size optimization of spray boom[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(9): 50–56. (in Chinese)
- [11] TUDOSE L, STANESCU C, SOBESTER A. Improving machine dynamics via geometry optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2011, 44(4): 547–558.
- [12] CUI L F, MAO H P, XUE X Y. Hydraulic-drive roll movement control of a spray boom using adaptive robust control strategy[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(2): 2072051589.
- [13] CUI L F, XUE X Y, LE F X, et al. Design and experiment of electro hydraulic active suspension for controlling the rolling motion of spray boom[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(4): 72–81.
- [14] 蔡威. 宽幅喷雾臂架主动抑振控制研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2018.
CAI Wei. Study on active vibration suppression control of wide spray arm[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018. (in Chinese)
- [15] LEONARDO PINTO DE M, SÉRCIO A D, RAFAEL VIEIRA DE S, et al. Suspension system in a spray boom using a fractional PID controller[J]. *International Journal of Mathematical and Computational Methods*, 2016(1): 109–114.
- [16] ANTHONIS J, AUDENAERT J, RAMON H. Design optimisation for the vertical suspension of a crop sprayer boom[J].

- Biosystems Engineering, 2005, 90(2): 153 – 160.
- [17] 刘浩蓬, 龙长江, 万鹏, 等. 植保四轴飞行器的模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 71 – 77.
LIU Haopeng, LONG Changjiang, WAN Peng, et al. Fuzzy self-adjusting proportion integration differentiation for eppo quadcopter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 71 – 77. (in Chinese)
- [18] 齐磊. 倾转四旋翼飞行器短舱倾转过程控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
QI Lei. Control technology research on the nacelle tilting stage of quad tilt rotor aircraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [19] 史家顺, 董金龙, 刘聪, 等. 随五轴加工轨迹变抛光力的控制策略与方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 89 – 94.
SHI Jiashun, DONG Jinlong, LIU Cong, et al. Control strategy and method for variable polishing force adapting to the 5-axis machining trajectory[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2020, 41(1): 89 – 94. (in Chinese)
- [20] 李孟秋, 汪亮, 黄庆, 等. 自抗扰参数模糊自整定无刷直流电机控制研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(5): 71 – 78.
LI Mengqiu, WANG Liang, HUANG Qing, et al. Brushless DC motor control based on fuzzy self-tuning of active-disturbance rejection parameters[J]. Journal of Hunan University(Natural Science), 2014, 41(5): 71 – 78. (in Chinese)
- [21] 王梓藤. 四旋翼无人机驱动器闭环对姿态稳定性影响的研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
WANG Ziteng. Research on the attitude stability of the four rotor UAV driver[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016. (in Chinese)
- [22] 申珊颖. 斜十字四旋翼飞行器实验建模与控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
SHEN Shanying. Modelling based on experiment and control technology of an oblique cross quadrotor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [23] 韩豹, 杨亚楠, 王宏伟, 等. 苗间除草部件入土深度 PID 自动控制系统设计与台架试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 68 – 77.
HAN Bao, YANG Ya'nan, WANG Hongwei, et al. Design of PID automatic control system for depth into earth of intra-row weeding components and its bench experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 68 – 77. (in Chinese)
- [24] XU S W, WANG X F, YANG J M, et al. A fuzzy rule-based PID controller for dynamic positioning of vessels in variable environmental disturbances[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2020, 25(3): 914 – 924.
- [25] TAMILSELVAN G M, AARTHY P. Online tuning of fuzzy logic controller using Kalman algorithm for conical tank system[J]. Journal of Applied Research and Technology, 2017, 15(5): 492 – 503.
- [26] CHEN P Y, CHEN G Y. The design of a TLD and fuzzy-PID controller based on the autonomous tracking system for quadrotor drones[J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2020, 26(3): 489 – 500.
- [27] 齐文超, 李彦明, 张锦辉, 等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊 PID 控制方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 17 – 23, 34.
QI Wenchao, LI Yanming, ZHANG Jinhui, et al. Double closed loop fuzzy PID control method of tractor body leveling on hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 17 – 23, 34. (in Chinese)
- [28] 张雪飞, 袁鹏, 谭俊哲, 等. 基于模糊 PID 的无人帆船航向控制方法[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(6): 15 – 21.
ZHANG Xuefei, YUAN Peng, TAN Junzhe, et al. Heading control method of unmanned sailing boats based on fuzzy PID[J]. Chinese Ship Research, 2019, 14(6): 15 – 21. (in Chinese)
- [29] 杨航, 刘凌, 阎治安, 等. 双闭环 Buck 变换器系统模糊 PID 控制[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(4): 35 – 40.
YANG Hang, LIU Ling, YAN Zhian, et al. A fuzzy PID control strategy for Buck converter system of double closed loop circuits[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(4): 35 – 40. (in Chinese)
- [30] 耿爱军, 张猛, 张姬, 等. 玉米收获机割台高度自动调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 118 – 125.
GENG Aijun, ZHANG Meng, ZHANG Ji, et al. Design and experiment of automatic control system for corn header height[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 118 – 125. (in Chinese)
- [31] 张锦辉, 李彦明, 齐文超, 等. 基于神经网络 PID 的丘陵山地拖拉机姿态同步控制系统[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 356 – 366.
ZHANG Jinhui, LI Yanming, QI Wenchao, et al. Synchronous control system of tractor attitude in hills and mountains based on neural network PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 356 – 366. (in Chinese)
- [32] 吴开华, 孙学超, 张竞成, 等. 基于高度融合的植保无人机仿地飞行方法研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 17 – 23.
WU Kaihua, SUN Xuechao, ZHANG Jingcheng, et al. Terrain following method of plant protection UAV based on height fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 17 – 23. (in Chinese)