doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.030

基于 BAS 改进模糊 PID 算法的旋耕机具自适应调平控制研究

邱长龙[1]　马锃宏[1,2]　杜小强[1,3]　胡安国[4]　赵立军[5]　章呈杰[6]

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018;
3. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建), 杭州 310018;
4. 永康威力科技股份有限公司, 永康 321300; 5. 重庆文理学院智能制造工程学院, 重庆 402160;
6. 星光农机股份有限公司, 湖州 313017)

摘要: 针对温室、丘陵山区等小地块旋耕机作业时,机身横向倾角变化导致的旋耕作业质量差、作业效率低等问题,本文以纯电动履带式旋耕机为研究对象,设计了一种旋耕机具自适应调平系统,并提出了一种基于天牛须搜索算法(BAS)改进模糊 PID 的自适应调平控制策略。首先,给出了自适应调平整机结构方案和工作原理,在此基础上,建立了该调平系统的数学模型;其次,考虑旋耕作业负载工况的实时变化性,引入天牛须搜索算法(BAS)对控制器相关参数进行搜索,设计了自适应调平 BAS-模糊 PID 控制器。仿真结果表明,在 BAS-模糊 PID、模糊 PID、常规 PID 控制下,10°横向调平时间分别为 1.6、2.1、3.5 s,相较于其他 2 种控制,BAS-模糊 PID 减小了调平时间,且超调量较小。田间试验结果表明,采用 BAS-模糊 PID 调平系统作业后的测点高程最大标准差相较于作业前下降 68.0%,平均耕深变异系数为 7.45%;而使用模糊 PID 调平系统的测点高程最大标准差降幅仅为 41.5%,平均耕深变异系数为 8.65%。采用 BAS-模糊 PID 调平控制系统能够保持机具水平作业状态,在耕深变异系数降低 13.9%的基础上,可显著提高田块地表平整度效果。

关键词: 电动履带旋耕机; 旋耕深度; 自适应调平机构; 天牛须搜索算法; 模糊 PID 控制

中图分类号: S222.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)09-0385-10　　**OSID**:

Adaptive Leveling Control of Rotary Tillage Equipment Based on BAS - fuzzy PID Algorithm

QIU Changlong[1]　MA Zenghong[1,2]　DU Xiaoqiang[1,3]　HU Anguo[4]　ZHAO Lijun[5]　ZHANG Chengjie[6]

(1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Zhejiang Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou* 310018, *China*
3. *Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas in Southeastern China (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou* 310018, *China*
4. *Yongkang Valid Garden Machine Co., Ltd., Yongkang* 321300, *China*
5. *College of Intelligent and Manufacturing Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing* 402160, *China*
6. *Xingguang Agricultural Machinery Co., Ltd., Huzhou* 313017, *China*)

Abstract: During rotary tillage operations on small plots such as greenhouses and hilly areas, poor quality and low operational efficiency are generally caused by lateral tilt angle variations of the machine body. Taking an electric tracked rotary tillage machine as the research subject, an adaptive leveling system for the rotary tillage equipment was designed. Furthermore, an adaptive leveling control strategy was proposed based on the beetle antennae search (BAS) algorithm to enhance fuzzy PID control. Firstly, the structural scheme and working principle of the adaptive leveling system was presented,

收稿日期: 2024-06-08　修回日期: 2024-07-27

基金项目: 浙江省农机研发制造推广应用一体化试点项目(YF20220801)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJZD-M202201302)、重庆市科技局英才计划项目(20231102)、重庆市科技局创新发展联合基金项目(CSTB2022NSCQ-LZX0024)和杭州市科技发展计划项目(202203A03)

作者简介: 邱长龙(2000—),男,硕士生,主要从事智能农业装备研究,E-mail: qiu_chang_long@163.com

通信作者: 马锃宏(1986—),男,副教授,博士,主要从事农业机器人研究,E-mail: mzhsss@126.com

followed by the establishment of the mathematical model for the leveling system. Considering the real-time variability of load conditions during rotary tillage operations, an improved fuzzy PID algorithm was designed, incorporating the BAS algorithm to search for relevant controller parameters. Simulation results demonstrated that under BAS - fuzzy PID, fuzzy PID, and conventional PID control, the lateral leveling times were 1.6 s, 2.1 s, and 3.5 s, respectively. Compared with the other two controls, BAS - fuzzy PID reduced leveling time and exhibited smaller overshoot. Finally, field tests were conducted on the electric tracked rotary tillage machine equipped with adaptive leveling control. The maximum standard deviation of the measured point elevation of the operation with BAS - fuzzy PID control was decreased by 68.0% compared with that before operation, and the average coefficient of variation of the tillage depth was 7.45%, while the maximum standard deviation of the measured point elevation of the operation with fuzzy PID control was decreased by only 41.5%, and the average coefficient of variation of the tillage depth was 8.65%. The field tests demonstrated that the BAS - fuzzy PID leveling control system can maintain the equipment's level operational state and significantly improve the leveling effect of the field surface, based on a 13.9% reduction in the variation of plowing depth stability.

Key words: electric tracked rotary tillage machine; rotary plowing depth; adaptive leveling system; BAS; fuzzy PID control

0 引言

我国丘陵山区耕地面积占全国耕地面积 1/3，是保障粮食产量的重要来源之一。然而，丘陵山区农作物耕种、收获综合机械化率却不到 50%，低于全国平均水平 20 多个百分点[1]。旋耕机作为一种重要的农业机械设备，在农业生产中扮演关键角色。由于丘陵山区地形崎岖，地面凹凸不平，传统的旋耕机在作业过程中常导致土壤不平整，影响作物的生长和发育。为了解决这一问题，需对旋耕机具姿态进行调平，提高旋耕质量，保障粮食丰产。

目前，国内外对农机具调平方面的研究已经取得了一定进展[2-5]。自适应调平系统最早应用于重工业和军事领域[6]，随着传感器技术和计算机通讯技术的发展，自适应调平系统渐渐应用于农业机械底盘和机具的调节。美国约翰·迪尔公司研发了一种具有调平控制系统的坡地联合收获机，能够满足坡地作业需求，但是该调平控制系统不适用于复杂作业环境的丘陵山地[7]。彭凯等[8]在 1GDZ - 150 型履带式旋耕机的三点悬挂装置基础上研制了调平机构和调平控制系统，以信号处理后的旋耕机倾角作为自适应 PID 控制输入，液压油缸控制量作为输出。周浩等[9]基于姿态传感器设计了一种旋耕机实时水平控制系统，根据拖拉机的横滚角驱动电磁阀来调节调平油缸的行程，以保证旋耕机在田间作业时水平。周俊等[10]基于 GNSS 卫星导航控制技术，研发一款高精度液力式智能控制系统，可实现水田旋耕机水平和高度方向的双重调节，水田地表平整度可达 3 cm 左右。章铁成[11]提出了基于模糊 PID 控制的单油缸水平自适应控制系统，对旋耕机组液压水平控制系统进行了建模与仿真，并通过田间试验验证。吴帆等[12]设计了一种机具自动调平系统，并通过 AMESim 软件分别研究了常规 PID 与模糊 PID 的响应时间与精度、连续响应时间与精度，但是模糊 PID 参数整定的问题依然没有得到解决。

尽管当前农用田间自动调平控制系统取得了一定成果[13-18]，但面向丘陵山区的纯电动履带式旋耕机调平系统设计与研发仍处于起步阶段，目前的调平执行机构主要以液压油缸为主，由于液压系统的非线性时滞性，难以满足旋耕作业实时调平控制需求，且经典 PID 控制中固定参数，难以应对变化负载引起的系统动态特性变化。本文设计一种自适应调平系统，提出基于天牛须搜索算法(BAS)改进模糊 PID 的自适应调平控制策略，分析比较不同调平控制算法性能，并通过 Matlab/Simulink 仿真及田间试验加以验证。

1 电动履带旋耕机自适应调平方案设计

1.1 自适应调平结构方案

电动履带旋耕机自适应调平系统包括三点悬挂机构、旋耕机具、倾角传感器、调平执行机构和控制器等关键组件。其方案原理如图 1 所示，在三点悬挂机构中，右提拉杆被替换为伺服电缸，作为调平执行机构。调平电缸一端与三点悬挂右提升臂铰接，另一端与右下拉杆铰接，通过伺服电缸的伸缩来实现旋耕机具在水平方向的调节。倾角传感器安装在旋耕机具上方，用于检测倾斜角度。自适应调平控制系统集成在履带底盘上方的控制箱内，用于实现调平功能。

1.2 调平工作原理

电动履带旋耕机作业时，旋耕机具上方固定安装的倾角传感器负责实时监测并传输机具倾斜角度

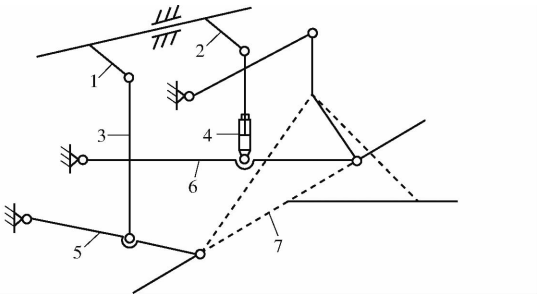


图 1　调平机构方案原理图

Fig. 1　Schematic of leveling system

1. 左提升臂　2. 右提升臂　3. 左提拉杆　4. 调平电缸　5. 左下拉杆　6. 右下拉杆　7. 旋耕机具

至控制单元，控制单元依据接收到的倾斜角度信息，精准控制伺服电缸伸缩动作，从而确保旋耕机具保持平稳作业状态。调平机构示意图如图 2 所示。AC 为简化后的右下拉杆，EB 为简化后的调平电缸，点 E 为电缸与三点悬挂提升臂的铰接点，点 B 为电缸与右下拉杆的铰接点。其中，BC 为电缸处于 100 mm 行程时的位置，B_1C_1 为电缸缩回到最短时的位置，θ_1 为作业时右下拉杆倾斜角。点 C 为右下拉杆与旋耕机具的铰接点，点 D 为左下拉杆与旋耕机具的铰接点，H 为旋耕机具受电缸作用单侧所抬升高度，θ 为旋耕机具倾斜角。

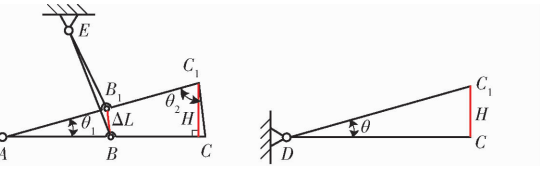


图 2　调平机构示意图

Fig. 2　Leveling mechanism diagram

利用三角函数关系可得

$$\theta_1 = \arccos\frac{l_a^2 + l_b^2 - (\Delta l)^2}{2l_a l_b} \tag{1}$$

$$\sin\theta_1 = \frac{H}{l_c} \tag{2}$$

式中　l_a——铰接点 A、B_1 间长度，mm

l_b——铰接点 A、B 间长度，mm

l_c——铰接点 A、C_1 间长度，mm

Δl——电缸伸缩位移，mm

而旋耕机具倾斜角 θ 与旋耕机具单侧所抬升高度 H 之间的关系为

$$\theta = \arctan\frac{H}{l_d} \tag{3}$$

式中　l_d——铰接点 C、D 间长度，mm

联立式(1)、(2)、(3)可解得电缸行程 Δl 与旋耕机具倾斜角 θ 之间的数学关系为

$$\theta = \arctan\frac{l_c\sin\left(\arccos\dfrac{l_a^2 + l_b^2 - (\Delta l)^2}{2l_a l_b}\right)}{l_d} \tag{4}$$

2　调平控制数学模型建立

2.1　伺服电机传递函数

本文中伺服电缸的动力源选用永磁交流伺服同步电机。针对永磁交流伺服同步电机(PMSM)的控制，目前普遍采取矢量控制方式[19]。矢量控制技术借鉴了直流电机电枢电流和励磁电流相互垂直、没有耦合以及可以独立控制的思路。通过控制电机定子电流在同步旋转坐标系中的大小和方向，实现对直轴和交轴分量的解耦，从而实现对磁场和转矩的解耦控制，使交流电机具有类似直流电机的控制性能[20]。本文将采用 i_d 为 0 的控制方式对永磁交流伺服同步电机进行数学建模[21]。建模需构建其定子电压方程式、电机转矩运动平衡方程。经过运算转换和拉氏变换后，得伺服电机传递函数为

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{\mu_q(s)} = \frac{K_t}{JLs^2 + JRs + K_eK_t} \tag{5}$$

式中　$G(s)$——伺服电机传递函数

$\omega(s)$——系统输出角速度传递函数

$\mu_q(s)$——系统输入电压传递函数

K_t——电磁转矩系数，N·m/A

J——转子转动惯量，kg·m^2

L——电感交轴、直轴分量，H

R——定子绕组电阻，Ω

K_e——电机反动势系数，V·s/rad

2.2　机械传动系统建模

通过减速器与滚珠丝杠，电机的旋转角位移被精确转换为电缸的升降位移。具体而言，电机旋转角度与电缸升降位移之间的关系为

$$\frac{\Delta l}{p} = \frac{\omega t}{2\pi k} \tag{6}$$

式中　p——滚珠丝杠导程，mm

t——时间，s

k——减速器减速比

ω——伺服电机旋转角速度，rad/s

将式(6)经过拉氏变换后可得到减速装置和滚珠丝杠的传递函数为

$$G'(s) = \frac{l(s)}{\omega(s)} = \frac{p}{2\pi ks} \tag{7}$$

式中　$G'(s)$——机械传动系统传递函数

$l(s)$——电缸升降位移传递函数

2.3　位置控制器传递函数

为使电机的转矩与转速达到可控要求，需对其进行电流环与转速环的设计，从而实现自适应调平系统的高精度控制，同时提高电机的安全性和工作性能[22]。本文的电机控制采用经典的电流环、转速

环的双闭环控制方式。由内到外设计伺服系统的多环闭环控制,先设计电流环,然后设计转速环时将电流环作为其内部构成,最后设计位置控制器[23]。电流环采用 PI 电流环控制器 ACR,转速环采用 P 转速环控制器 ASR。为了方便分析和计算,将双闭环动态结构转换为图 3 所示的形式。

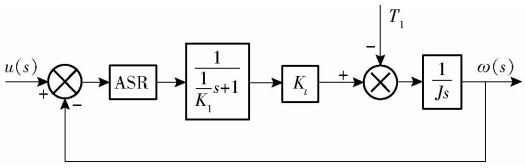


图 3 双闭环简化框图

Fig. 3 Simplified block diagram of double closed loop

根据图 3 得出系统转速环的传递函数为

$$G_v(s)=\frac{K_{p2}K_t}{Js\left(\frac{1}{K_1}s+1\right)+K_{p2}K_t} \tag{8}$$

式中 K_1——电流环比例系数

K_{p2}——转速环比例系数

结合图 3 以及机械传动系统传递函数,可得位置控制器传递函数为

$$G(s)=\frac{K_1K_tp}{2\pi k}\frac{1}{s(Js^2+K_1Js+K_1K_t)} \tag{9}$$

将表 1 所示伺服电机各项参数代入式(9),得到位置控制器传递函数为

$$G(s)=\frac{51\,657.875}{s^3+135.168s^2+10\,331.575s} \tag{10}$$

表 1 电机主要性能参数

Tab. 1 Main specification parameters of motor

参数	数值
电磁转矩系数 K_t/(N·m·A^{-1})	0.05
转速环比例系数 K_{p2}	1
电流环比例系数 K_1	135.137
滚珠丝杠导程 p/mm	5
减速器减速比 k	3
转子转动惯量 J/(kg·m^2)	3.4×10^{-5}
定子绕组电阻 R/Ω	58.6
惯性时间常数 T_1/s	0.003 7

3 BAS 改进模糊 PID 控制策略设计

电动履带旋耕机自适应调平控制系统的模糊 PID 控制算法结构如图 4 所示,$\theta(t)$表示理想旋耕机具倾角信号,$y(t)$表示实际旋耕机具倾角信号,e为倾角误差,先通过模糊控制器对 PID 参数 K_p、K_i、K_d进行实时更新,再通过 PID 控制器输出最佳的控制参数给调平执行机构,最终控制伺服电缸进行伸缩动作,从而实现旋耕机具自适应调平控制。

在上述传统的模糊 PID 控制中,$K_{\Delta p}$、$K_{\Delta i}$、$K_{\Delta d}$

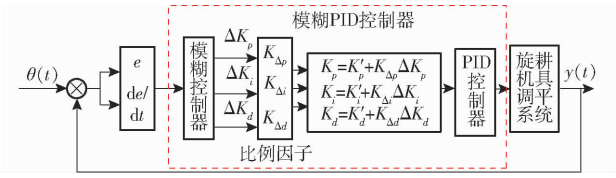


图 4 BAS 改进模糊 PID 控制框图

Fig. 4 BAS - fuzzy PID control block diagrams

3 个比例因子需要根据经验进行设定,若参数选择不当,可能导致系统不稳定、产生超调,无法有效应对调平控制系统中的系统误差和随机误差[24]。为了提高系统响应速度、增强抗干扰能力,充分发挥模糊 PID 控制器性能,本文采用 BAS 算法的搜索寻优能力,对模糊 PID 3 个比例因子参数值进行离线寻优,旨在解决模糊 PID 比例因子难以整定的问题。

在搜索算法领域,BAS 与遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)等其它搜索算法类似,都能够实现对目标的高效寻优,其优势在于具有更少的参数需要调整,简化了算法模型,减少了计算量,尤其在低维优化问题上表现出更强的搜索能力和更快的收敛速度。此外,BAS 作为一种单体搜索算法,避免了群体维护的复杂性,使得算法实现更为高效和直接。在设计 BAS 优化算法之前,假设以下条件成立:①将天牛简化为一个以三维坐标表示的质心。②牛的两触角是对称的,且到质心的距离相等。③天牛飞行距离和左右触角间距离为比例关系。④天牛两触角朝向和运动方向具有随机性。

具体而言,BAS 算法的迭代优化过程包括以下步骤:

(1)初始化参数。设定天牛种群维数为 K,迭代次数最大为 T_{max},天牛初始步长为 S_0,天牛质心到其触须的初始距离为 d_0,衰减系数 h_0,设定需优化的比例因子参数对应的上界 U_b和下界 L_b,在界定范围内初始化 N 只天牛的位置 $P(i)$。

(2)适应度函数是根据均方根误差建立的评价函数,ITAE 表达式为

$$F=\int_0^{\infty}t|e(t)|\mathrm{d}t \tag{11}$$

(3)建立单位随机向量 $\boldsymbol{b}$,用其表示天牛两触角的随机位置朝向,因为在寻食过程中,其运动方向是随机的。

$$\boldsymbol{b}=\frac{\mathrm{rnd}(K,1)}{\|\mathrm{rnd}(K,1)\|_2} \tag{12}$$

式中 rnd( )——随机函数

$\|\ ,\|_2$——二范数

(4)确定天牛 t 时刻后左右两触角的坐标位置。

$$\boldsymbol{p}_r=\boldsymbol{p}_t+\boldsymbol{d}_t\boldsymbol{b} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{p}_l=\boldsymbol{p}_t-\boldsymbol{d}_t\boldsymbol{b} \tag{14}$$

式中　$\boldsymbol{p}_r$、$\boldsymbol{p}_l$——左右两触角的坐标

$\boldsymbol{d}_t$——t 时刻天牛质心到其触须的距离

$\boldsymbol{p}_t$——天牛在飞行时间 t 后的最终位置

(5)在 t 时刻通过对比左右两触角的适应度函数 F 值,如果左触角的 F 值小于右触角的 F 值,说明右侧食物气味比较强,天牛则会向右飞行,否则,往左飞行。天牛在飞行 t 时间后的位置为

$$\boldsymbol{p}_{t+1}=\boldsymbol{p}_t+s_t\boldsymbol{b}\,\mathrm{sign}(F(\boldsymbol{p}_r)-F(\boldsymbol{p}_t)) \tag{15}$$

式中　s_t——在 t 时刻的搜索步长因子

sign( )——符号函数

(6)通过式(11)计算出天牛在位置 $\boldsymbol{p}_{t+l}$ 时刻的适应度函数值 $F(\boldsymbol{p}_{t+l})$,并与最佳适应值 F_{best} 相比较,如果 $F(\boldsymbol{p}_{t+l})<F_{\mathrm{best}}$,则可得到 $F_{\mathrm{best}}=F(\boldsymbol{p}_{t+l})$、$\boldsymbol{p}_{\mathrm{best}}=\boldsymbol{p}_{t+l}$。

(7)天牛找到食物的时间由步长决定,即步长决定着该算法的收敛速度。天牛在其靠近食物的过程中必须实时更新步长,使自己与目标食物的距离逐渐缩短,实时更新步长的公式为

$$s_t=h_0s_{t-1} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{d}_t=h_0\boldsymbol{d}_{t-1} \tag{17}$$

(8)与所设定的最大迭代次数相比较,如果达到所设定次数,整个寻优过程完成,并输出天牛的全局最佳位置和与之相匹配的 ITAE 值;否则返回到步骤(4)中继续更新天牛下一步前进的坐标方向。

天牛须算法寻优搜索流程见图 5。

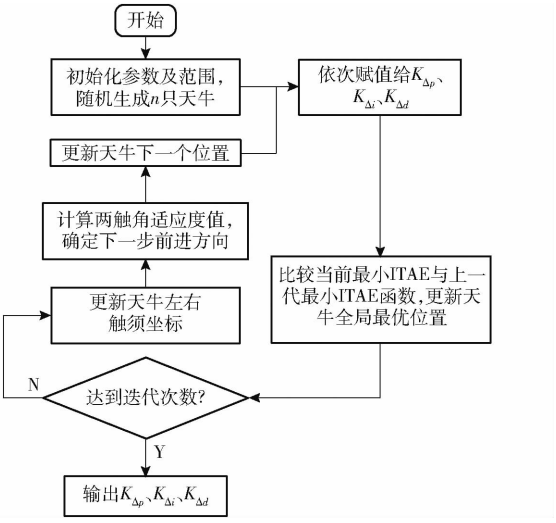


图 5　BAS-模糊 PID 水平调节控制系统参数整定流程图

Fig. 5　Parameter tuning flowchart for BAS - fuzzy PID leveling control system

当使用 BAS 算法优化模糊 PID 中的 3 个比例因子时,首先需初始化维数 $K=3$,设最大迭代次数 $T_{\max}=100$,初始化步长 $S_0=2$,初始天牛质心到触须距离 $d_0=2$,衰减系数 $h_0=0.95$。设置 $K_{\Delta p}$、$K_{\Delta i}$、$K_{\Delta d}$ 的上下界在[0,10]之间。再调用调平系统模糊 PID 控制器,通过计算得到当前迭代优化过程中的适应度值并更新天牛的全局最优位置。在迭代过程中,天牛的位置应使 ITAE 最小化,据此更新比例因子参数,并判断是否满足最大迭代次数的结束条件。若自适应调平控制系统的性能符合要求或迭代次数已达到设定值,系统将输出天牛的最优位置作为最终的优化参数,然后停止运行;未满足结束条件时,继续根据公式(13)、(14)更新天牛坐标,计算当前迭代中种群适应度的最值,确定下一步前进方向,根据公式(15)继续更新天牛下一步位置,并返回步骤(2),以此往复,直至满足迭代次数要求,整定后的比例因子及天牛须优化指标变化曲线如图 6 和图 7 所示。

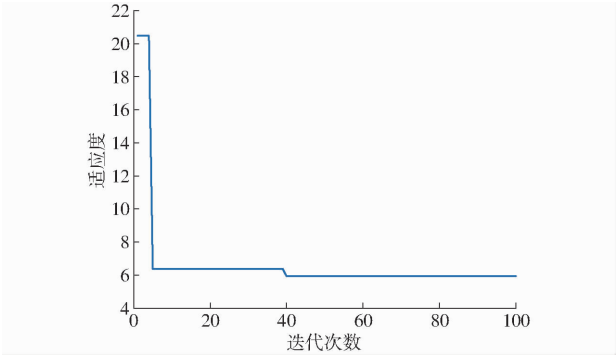


图 6　适应度函数迭代曲线

Fig. 6　Iterative plot of fitness function

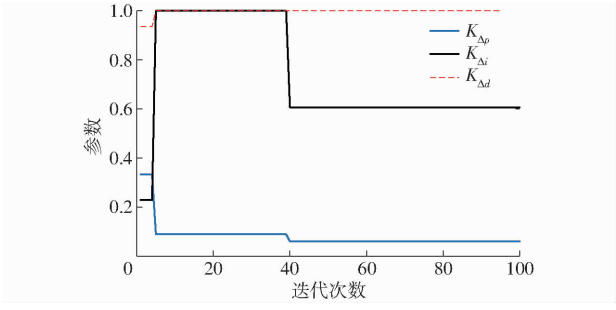


图 7　参数迭代曲线

Fig. 7　Parameter iteration chart

由图 6 可以看出,迭代优化 40 次后,调平控制系统趋向于稳定,评价函数值波动较小也逐渐稳定。从图 7 可以看出,迭代 40 次后,优化的 3 个参数值基本保持不变,比例因子参数值依次为 0.1、0.6、1.0。

4　自适应调平控制性能仿真

为了分析自适应调平控制系统的稳定性及响应速度,采用 Matlab/Simulink 模块对自适应调平控制系统进行仿真。将机具倾角信号作为控制器输入,伺服电缸控制信号作为控制器输出,搭建自适应调

平控制系统的 Simulink 仿真模型。为验证本文所设计 BAS-模糊 PID 算法的控制性能,在算法模型中还搭建了 PID、模糊 PID 控制器进行对比,由经验法和试错法得到的相关控制参数如表 2 所示,其中 K_p、K_i、K_d在模糊 PID 和 BAS-模糊 PID 中均为初始值,BAS-模糊 PID 中比例因子由天牛须搜索算法经过寻优得到。

表 2 控制参数设置

Tab. 2 Control parameters setting

参数	经典 PID	模糊 PID	BAS-模糊 PID
K_p	0.87	0.87	0.87
K_i	0.76	0.76	0.76
K_d	-0.05	-0.05	-0.05
$K_{\Delta p}$		0.2	0.1
$K_{\Delta i}$		0.6	0.6
$K_{\Delta d}$		0.3	1

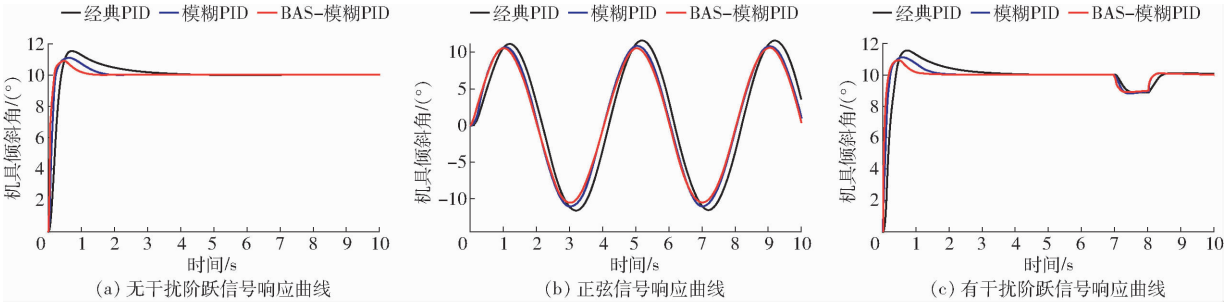
在水平调节控制仿真中,为清晰分析 3 种不同控制算法的控制性能,定义了如下 3 种性能指标:

(1)完成时间。系统稳定在目标值某一误差范围内所需的时间。

(2)超调量。系统输出超过稳态目标值的最大幅度,通常以稳态值为基准来计算。

(3)系统跟踪误差。系统目标值与实际值之间的偏差,一般采用均方误差来衡量。

仿真试验分为 3 组进行,通过改变输入信号,分析不同信号的响应曲线,仿真结果如图 8 所示。从图 8a 可看出,在阶跃信号下,经典 PID 的超调量最大,达到了 17%;其次为模糊 PID,超调量为 15%;BAS-模糊 PID 超调量最小,约为 13%。3 种控制算法的完成时间依次为 3.5、2.1、1.6 s,其中,BAS-模糊 PID 的完成时间最短,相较于另外 2 种控制算法分别缩短 23.8% 和 54.3%。考虑到实际控制过程中会有很多干扰因素,因此有必要对其抗干扰性进行分析,从图 8c 可看出,在突然遇到扰动时,BAS-模糊 PID 控制算法波动较小且能快速恢复稳态值,能够有效地抑制外界干扰。另一方面,为验证 BAS-模糊 PID 控制算法的位置跟踪性能,对其进行正弦信号响应分析。由图 8b 可知,在输入频率为 0.25 Hz,振幅为 10°的正弦信号时,采用 BAS-模糊 PID 控制算法能够快速响应,系统位置跟踪误差约为 0.461°。以上分析表明,经过 BAS 改进后的模糊 PID 算法能够满足旋耕机具调平的需求,在响应速度、超调量、鲁棒性及位置跟踪方面均优于经典 PID 和未改进的模糊 PID。



(a) 无干扰阶跃信号响应曲线 (b) 正弦信号响应曲线 (c) 有干扰阶跃信号响应曲线

图 8 调平控制系统仿真结果

Fig. 8 Simulation results of leveling control system

5 试验

5.1 试验设备及仪器

田间试验采用自主研发的纯电动履带式旋耕机,该样机行走采用额定功率为 2 kW 的电机,最大行驶车速 3 km/h,旋耕刀转速 300 ~ 500 r/min。应用深圳维特 SINAT-RS485 型角度传感器、计算机、ESP32-C3-32s 单片机、莱瑞 ds32 型水准仪、卷尺、塔尺、秒表等器材进行试验数据采集。

5.2 静态调平性能试验

静态调平试验为在旋耕机静止状态下进行的自适应调平试验。本次调平试验最大调平角度为 ±15°,试验过程为每隔 5°进行一组试验,其中调平时间指调平系统启动直到调平结束的全程时长,而调平精度则是指调平后角度与设定角度的偏差,这 2 项指标均通过系统自动测出,并通过网页显示进行记录,调平控制系统显示界面如图 9 所示。对每组进行 5 次重复试验,平均调平时间和调平精度见表 3。



图 9 调平控制系统显示界面

Fig. 9 Leveling control system display interface

表 3　静态调平试验结果

Tab. 3　Static leveling test data

机具倾斜角度/(°)	调平时间/s	调平精度/(°)
-15	2.574	0.437
-10	2.285	0.382
-5	1.403	0.375
5	1.369	0.397
10	2.065	0.385
15	2.368	0.412

从表 3 可以看出，在自适应调平模式下能将机具倾斜角度调至 0.5°范围内，车身在倾斜 ±10°的情况下，分别以 2.065 s 和 2.285 s 完成调平，比仿真调平时间多 0.465 s 和 0.685 s，这是仿真中忽略了传感器信号与控制指令传输的延迟等因素造成的。

5.3　田间作业质量试验

5.3.1　试验原理

采用模糊 PID 调平系统和基于 BAS 改进模糊 PID 调平系统分别对旋耕机具三点悬挂上的调平电缸进行调节。在不同的工况下，采用 BAS-模糊 PID 控制策略验证田间作业性能。根据 GB/T 5668—2017 对不同控制方式下的旋耕机作业质量进行测试，以旋耕作业后耕深变异系数和地表平整度作为评价指标。

5.3.2　试验方法

如图 10 所示，电动履带旋耕机田间作业质量试验于 2024 年 5 月在浙江鑫远智能装备集团试验田进行，地块大小为 20 m × 10 m，土壤类型为典型壤土，地块不平整程度相近。



图 10　田间试验现场

Fig. 10　Field test

因旋耕机具宽幅为 1 000 mm，因此将试验田划分成 4 块 2 m × 20 m 的试验区域，并按从左至右排列顺序依次编号为 1、2、3、4，试验过程中旋耕机具平均转速取 400 r/min，将电动履带旋耕机平均运行速度设置为 1 km/h 和 2 km/h。试验分组设置如表 4 所示。

旋耕前后地表平整度和垄上耕深测定方法为：

表 4　试验条件分组

Tab. 4　Combination of test conditions of tiller

工况	试验区域	控制方法	工作速度/(km·h^{-1})
1	1	模糊 PID	1
2	2	BAS-模糊 PID	1
3	3	模糊 PID	2
4	4	BAS-模糊 PID	2

(1)耕前、耕后地表平整度

试验前，使用莱瑞 ds32 型水准仪测量整个试验区域的平整度，具体测量方法为：将水准仪放置在能够观察到整个试验区域的位置，试验过程中位置固定不动；每个试验区域序号用 j 表示($j=1,2,\cdots,8$)，在沿机组前进方向上每隔 2 m 左、右各测定 1 个点，利用水准仪测量其相应高度为 H_{ji}($j=1,2,\cdots,8$；$i=1,2,\cdots,20$)；旋耕作业后，利用水准仪分别测出上述各个测点旋耕后对应的高度 H'_{ji}。

(2)耕深

旋耕作业后，在每个行程的测量点处除去旋耕产生的碎土，用水准仪测出各点的高度 H''_{ji}，则每个测点耕深 a_{ij} 为

$$a_{ij}=H''_{ji}-H_{ji} \tag{18}$$

使用水准仪来测量各测点高度，为了展示各测点地表平整度，所测数据统一转换到水准仪三脚架底部所在的水平面上(水准仪安装高度为 150 cm)。

5.3.3　试验结果分析

(1)地表平整度

表 5 和表 6 为不同工况下试验前后地表平整度。在试验过程中，由于设置的控制算法和工作速度不同，得到的结果也不同。在不同工况下，旋耕后地表平整度标准差相较于旋耕前均有下降，其中 2 号试验区域降幅最大，达 2.06 cm。在模糊 PID 控制下，最大标准差为 1.87 cm，相较于旋耕前下降 1.3 cm，降幅为 41.5%。在 BAS-模糊 PID 控制下得到的地表平整度最大标准差由 3.03 cm 降至 0.97 cm，降幅达 68.0%。选取所有测点数据，计算旋耕前后测点横向高程差，结果如图 11 所示。旋耕后各测点的横向高程差均有所下降，4 种工况下的横向高程差平均降幅分别为 55.1%、71.5%、48.9%、64.9%。在相同工作速度下，采用 BAS 改进模糊 PID 算法的降幅均高于传统模糊 PID。由此可见，与模糊 PID 算法相比，采用 BAS-模糊 PID 算法对保持机具水平作业状态、提高田块地表平整度作用更加明显，能够更有效地减小地表平整度波动幅度。

(2)耕深

旋耕作业后，将采集的测点数据根据式(18)计

表 5 工作速度 1 km/h 下旋耕前后地表平整度

Tab. 5 Surface leveling data before and after rotary plowing at working speed of 1 km/h

试验区域	测点编号	旋耕前测点高程/cm				旋耕后测点高程/cm			
		左	右	平均值	标准差	左	右	平均值	标准差
1	1	31.2	35.2	32.025 0	2.90	33.4	35.8	34.245	1.50
	2	32.0	36.8			34.6	36.5		
	3	29.2	30.5			32.8	33.2		
	4	35.5	28.7			35.9	32.4		
	5	37.2	29.1			36.1	33.6		
	6	32.1	30.6			35.5	33.2		
	7	36.7	30.3			37.4	33.9		
	8	32.5	33.4			34.3	32.4		
	9	33.6	28.3			34.5	32.8		
	10	28.8	30.5			32.4	32.5		
	11	34.1	33.5			36.5	35.8		
	12	35.5	30.8			35.1	33.2		
	13	28.7	34.1			33.8	35.7		
	14	28.2	35.7			33.3	36.2		
	15	30.6	31.0			34.2	34.6		
	16	27.4	29.3			31.2	32.5		
	17	36.8	28.5			36.1	33.8		
	18	37.1	29.3			36.3	33.5		
	19	32.5	34.6			34.6	35.1		
	20	30.4	30.7			33.0	32.1		
2	1	31.2	35.4	32.452 5	3.03	34.5	35.1	34.425	0.97
	2	29.6	36.8			33.9	35.5		
	3	36.4	29.1			35.2	33.1		
	4	37.1	30.2			35.7	33.8		
	5	34.4	30.7			35.4	34.6		
	6	31.1	31.8			34.3	34.1		
	7	27.1	32.5			33.2	34.5		
	8	30.7	32.1			33.8	34.6		
	9	31.9	36.7			34.1	35.5		
	10	29.4	35.6			33.3	36.6		
	11	32.2	33.3			34.8	34.1		
	12	33.1	36.2			34.8	35.5		
	13	28.5	34.7			33.2	35.6		
	14	31.6	29.5			34.4	33.3		
	15	37.8	28.4			35.1	33.1		
	16	36.5	27.6			35.9	32.7		
	17	28.2	32.3			32.5	33.3		
	18	33.8	31.4			34.4	34.9		
	19	36.9	29.3			35.5	33.4		
	20	36.2	30.8			35.1	34.6		

表 6 工作速度 2 km/h 下旋耕前后地表平整度

Tab. 6 Surface leveling data before and after rotary plowing at working speed of 2 km/h

试验区域	测点编号	旋耕前测点高程/cm				旋耕后测点高程/cm			
		左	右	平均值	标准差	左	右	平均值	标准差
3	1	34.5	28.1	32.720 0	3.17	36.5	32.3	34.102 5	1.87
	2	35.8	28.8			34.1	33.4		
	3	36.4	33.5			35.4	34.7		
	4	34.7	28.6			36.4	30.1		
	5	31.1	33.3			33.6	35.7		
	6	27.3	37.4			30.1	36.2		
	7	29.6	37.9			31.9	36.6		
	8	34.8	30.2			36.3	33.5		
	9	33.2	33.8			33.2	33.8		
	10	31.9	32.3			33.2	33.6		
	11	27.3	28.5			30.5	31.1		
	12	27.8	35.1			30.4	34.7		
	13	32.6	37.6			33.9	35.2		
	14	35.9	32.4			36.6	34.5		
	15	34.2	30.3			35.8	33.1		
	16	35.8	29.7			36.6	33.7		
	17	34.2	30.2			36.1	33.5		
	18	33.9	37.3			35.3	35.4		
	19	30.5	36.1			33.7	35.3		
	20	29.4	36.8			32.9	35.2		
4	1	32.2	31.1	32.447 5	3.15	34.1	33.7	34.032 5	1.15
	2	35.4	33.8			36.8	34.5		
	3	35.8	30.2			34.7	33.1		
	4	30.3	27.6			33.5	32.4		
	5	37.7	31.5			36.2	33.8		
	6	36.2	31.7			35.5	34.2		
	7	34.5	28.2			35.3	32.7		
	8	32.8	32.8			34.3	32.8		
	9	34.6	28.6			34.7	33.6		
	10	35.9	27.4			34.1	33.8		
	11	29.4	33.5			32.7	35.2		
	12	28.6	36.3			32.5	35.3		
	13	30.7	34.6			33.5	34.6		
	14	33.2	28.5			35.1	32.5		
	15	35.8	30.1			34.9	32.6		
	16	37.5	30.8			35.6	32.8		
	17	36.8	29.6			34.4	33.1		
	18	37.1	30.2			35.5	33.5		
	19	35.4	28.4			34.9	32.4		
	20	35.3	27.8			34.2	32.2		

算得到耕深,如表 7 所示。在模糊 PID 控制下,耕深标准差平均值为 1.145 cm,平均耕深变异系数为 8.65%;采用 BAS-模糊 PID 控制方法得到耕深标准差平均值为 0.99 cm,平均耕深变异系数为 7.45%。与模糊 PID 相比,采用 BAS-模糊 PID 控制算法使得耕深变异系数降低 13.9%。

6 结论

(1)设计了旋耕机自适应调平系统,根据倾角传感器实时检测到的旋耕机具倾斜角度,精准控制伺服电缸伸缩运动,实现了旋耕机具的自适应调平控制,使其始终保持平稳作业状态。

(2)对基于天牛须搜索算法(BAS)改进模糊 PID 的自适应调平控制策略进行了仿真分析,结果表明阶跃信号响应下 10°横向调平时间为 1.6 s,超调量为 13%,相较于其他两种控制,BAS-模糊 PID

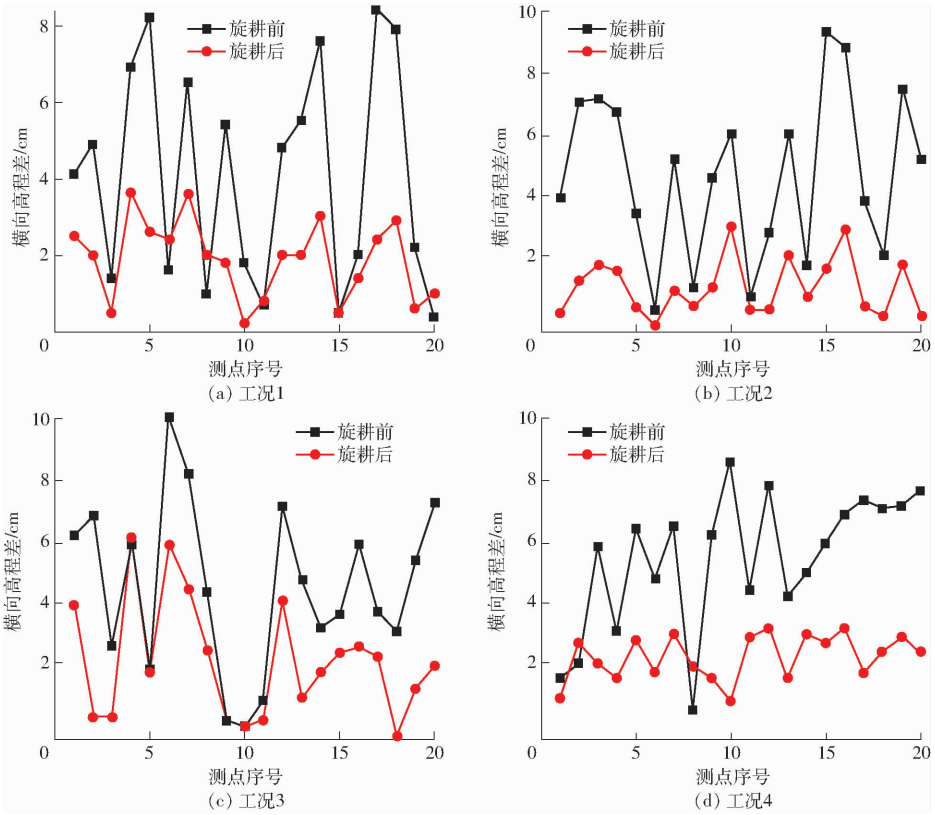


图 11　不同工况下地表横向高程差变化曲线

Fig. 11　Lateral height difference of measurement point under different working conditions

表 7　耕深数据

Tab. 7　Data of tillage depth

试验区域	控制方式	工作速度/(km·h^{-1})	平均耕深/cm	标准差/cm	耕深变异系数/%
1	模糊 PID	1	13.397 5	1.07	8.0
2	BAS-模糊 PID	1	13.480 0	0.85	6.3
3	模糊 PID	2	13.165 0	1.22	9.3
4	BAS-模糊 PID	2	13.105 0	1.13	8.6

缩短了调平时间，减小了超调量；在正弦信号响应下，系统跟踪误差为 0.461°，验证了所设计的 BAS-模糊 PID 算法的控制性能。

(3)田间试验表明，与普通的模糊 PID 控制相比，采用 BAS-模糊 PID 算法能够在耕深变异系数降低 13.9% 的基础上，显著提高田块地表平整度效果。

参　考　文　献

[1] 王东阳，何亚凯，韩亚芳，等. 丘陵山区农业机械研究现状及发展建议[J]. 农业工程，2023，13(12)：5-10.
WANG Dongyang, HE Yakai, HAN Yafang, et al. Current status and development suggestions of agricultural machinery research in hilly and mountainous areas[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(12): 5-10. (in Chinese)

[2] 刘刚，林建涵，司永胜，等. 激光控制平地系统设计与试验分析[J]. 农业机械学报，2006，37(1)：71-74
LIU Gang, LIN Jianhan, SI Yongsheng, et al. Development and experiment on laser controlled leveling system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 71-74. (in Chinese)

[3] 李林林，邓干然，林卫国，等. 农业机械自动调平技术发展现状与趋势[J]. 现代农业装备，2021，42(5)：2-7.
LI Linlin, DENG Ganran, LIN Weiguo, et al. Development status and trend of agricultural machinery automatic leveling technology[J]. Modern Agricultural Equipment, 2021, 42(5): 2-7. (in Chinese)

[4] 吕昊暾，胡召田，于泳超，等. 果园高位作业平台自动调平前馈 PID 控制方法[J]. 农业工程学报，2021，37(18)：20-28.
LÜ Haotun, HU Zhaotian, YU Yongchao, et al. Feedforward PID control method for the automatic leveling of an orchard high-position operation platform[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(18): 20-28. (in Chinese)

[5] 周志艳，周铭杰，陈羽立，等. 喷杆喷雾机旋翼悬浮式喷杆自动调平控制系统研究[J]. 农业机械学报，2022，53(12)：70-79.
ZHOU Zhiyan, ZHOU Mingjie, CHEN Yuli, et al. Automatic leveling control system of rotors hovering spray boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 70-79. (in Chinese)

[6] 李勇建，魏贵玲，邓劲松，等. 自动调平技术研究[J]. 压电与声光，2010，32(6)：949-952.
LI Yongjian, WEI Guiling, DENG Jinsong, et al. Research on automatic leveling technology [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2010, 32(6): 949-952. (in Chinese)

[7] HOEHN K W, TOMPSON W L. Remotely adjustable disk leveling system: US4809786[P]. 1989-03-07.
[8] 彭凯,蒋蘋,胡文武,等. 旋耕机三点悬挂机具调平机构的研制与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2015,41(6):676-679.
PENG Kai, JIANG Pin, HU Wenwu, et al. Design and test on the leveling mechanism of three point linkage for rotary tiller [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2015, 41(6): 676-679. (in Chinese)
[9] 周浩,胡炼,罗锡文,等. 旋耕机自动调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):117-123.
ZHOU Hao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on auto leveling system of rotary tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 117-123. (in Chinese)
[10] 周俊,许建康,王耀羲,等. 基于 GNSS 的智能水田旋耕平地机研究[J]. 农业机械学报,2020,51(4):38-43.
ZHOU Jun, XU Jiankang, WANG Yaoxi, et al. Development of paddy field rotary-leveling machine based on GNSS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 38-43. (in Chinese)
[11] 章铁成. 基于模糊 PID 的旋耕机组水平控制系统设计[D]. 杭州:浙江理工大学,2017.
ZHANG Tiecheng. Design of horizontal control system of rotary tiller based on fuzzy PID[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017. (in Chinese)
[12] 吴帆,蒋蘋,胡文武,等. 基于 AMESim 的旋耕机自动调平系统仿真分析与试验研究[J]. 中国农业科技导报,2020,22(8):64-74.
WU Fan, JIANG Pin, HU Wenwu, et al. Experimental study and simulation analysis of rotary tiller automatic leveling system based on AMESim[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(8): 64-74. (in Chinese)
[13] 王晓燕,邓博,谭丁炀,等. 无驱动式自动调平水田埋秆起浆整地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(2):20-31.
WANG Xiaoyan, DENG Bo, TAN Dingyang, et al. Design and experiment of undriven soil puddling machine with improved auto-leveling and straw-burying design for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 20-31. (in Chinese)
[14] 丁为民,孙元昊,赵思琪,等. 犁旋一体机自动调平系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(17):25-31.
DING Weimin, SUN Yuanhao, ZHAO Siqi, et al. Design and test of automatic leveling system of plough rotary machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 25-31. (in Chinese)
[15] 夏俊芳,李栋,刘国阳,等. 基于角度检测的拖拉机悬挂耕深电液监控系统研究[J]. 农业机械学报,2021,52(8):386-395.
XIA Junfang, LI Dong, LIU Guoyang, et al. Design and test of electro-hydraulic monitoring device for hitch tillage depth based on measurement of tractor pitch angle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 386-395. (in Chinese)
[16] 胡炼,林潮兴,罗锡文,等. 农机具自动调平控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 15-20.
HU Lian, LIN Chaoxing, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on auto leveling control system of agricultural implements [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 15-20. (in Chinese)
[17] 印祥,安家豪,王显,等. 高地隙施药机喷杆自动调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):98-105.
YIN Xiang, AN Jiahao, WANG Xian, et al. Design and test of automatic beam leveling system for high-clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 98-105. (in Chinese)
[18] 李庆,罗锡文,汪懋华,等. 采用倾角传感器的水田激光平地机设计[J]. 农业工程学报,2007,23(4):88-93.
LI Qing, LUO Xiwen, WANG Maohua, et al. Design of a laser land leveler for paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4): 88-93. (in Chinese)
[19] 张会娟,姚燕燕,刘建娟,等. 基于矢量控制的永磁同步电机控制方法研究[J]. 计算机测量与控制,2021,29(1):77-81.
ZHANG Huijuan, YAO Yanyan, LIU Jianjuan, et al. Research on method of PMSM based on vector contral[J]. Computer Measurement and Control, 2021,29(1):77-81. (in Chinese)
[20] 何计成,郑凯凯,马登刚,等. 永磁同步电机伺服系统矢量控制的设计与仿真[J]. 电子技术与软件工程,2015(2):152-152.
[21] 王涛,李勇,王青,等. 永磁同步电机矢量控制系统建模与仿真[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2011,31(6):648-652.
WANG Tao, LI Yong, WANG Qing, et al. Modeling and simulation research on PMSM control system[J]. Journal of Hebei University (Natural Science), 2011, 31(6): 648-652. (in Chinese)
[22] 关欣,李叶松. 永磁同步电机伺服系统 PI 参数整定[J]. 电气传动,2016,46(8):26-30.
GUAN Xin, LI Yesong. Tuning method for PI parameters of permanent magnet synchronous motor servo system[J]. Electric Drive, 2016, 46(8): 26-30. (in Chinese)
[23] 舒志兵. 交流伺服运动控制系统[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
[24] 王川川,赵锦成,齐晓慧,等. 模糊控制器设计中量化因子、比例因子的选择[J]. 四川兵工学报,2009,30(1):61-63.