

李腾辉,周德强,何冯光,等.基于遗传算法优化模糊PID的甘蔗收获机切割器控制系统[J].华中农业大学学报,2023,42(2):243-250.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.02.030

基于遗传算法优化模糊PID的甘蔗 收获机切割器控制系统

李腾辉¹,周德强^{1,2},何冯光³,邓干然³,崔振德³,王翔⁴,陈自宏³

1. 江南大学机械工程学院,无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室,无锡 214122;
3. 中国热带农业科学院农业机械研究所/农业农村部热带作物农业装备重点实验室/
广东省农业类颗粒体精量排控工程技术研究中心/湛江市类颗粒体动力学及精准精量排控重点实验室,
湛江 524091; 4. 雷州雷宝机械有限公司,湛江 524200

摘要 针对甘蔗收获机切割器无法自动控制入土深度,从而影响收获质量的问题,设计一套甘蔗收获机切割器入土深度自动控制系统。该系统主要包含角度式仿形机构、入土深度检测系统以及液压系统和控制系统。利用基于遗传算法优化的模糊PID控制算法进行入土深度的实时调节,通过 Simulink 阶跃响应以及带随机干扰的阶跃响应仿真,结果显示:基于遗传算法优化的模糊PID控制算法超调量为4.9%、调节时间为1.535 s,与PID控制算法以及模糊PID控制算法相比均有所改善。室内试验结果表明,基于遗传算法优化的模糊PID控制算法误差在(-0.5,0.5),误差最小,有效实现了切割器入土深度自动控制。

关键词 甘蔗收获机; 遗传算法; 模糊PID; 深度检测; 仿形机构; 智能农机

中图分类号 TP391.4; S238 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)02-0243-08

甘蔗作为我国最主要的糖料来源,主要种植于我国的广西、广东以及云南等地。2020/2021榨季我国糖料蔗种植面积约113万hm²。甘蔗收获机械化可以有效解决劳动力短缺,收获效率低的问题,但目前我国糖料蔗的机收率仍然很低,2020/2021榨季仅为5.29%,机收甘蔗破头率过高影响甘蔗宿根性和来年产量导致种植户接受程度较低是机收率较低重要原因之一。当前我国甘蔗收获机主要依靠手动调节,且在作业过程中基本不会对切割器的高低进行调节。由于手动调节操控性较差,导致割茬不齐,破头率高,影响宿根的发芽。因此,研究甘蔗收获机切割器控制系统具有重要的实际意义。

赖晓等^[1]研究表明,甘蔗密度、刀盘入土切割深度、土壤剪切强度以及土壤剪切强度与土壤硬度交互作用对于入土切割压力有显著影响。研究人员设计并建立了一种以系统的负载压力信号间接反映入土切割深度的甘蔗收获机切深自动控制系统,并结合正交试验和BP神经网络与回归分析分别建立了

切刀负载压力的预测数学模型^[2-5],该研究未考虑切割器入土时压力传感器的可靠性。李凯华等^[6]利用PLC技术结合负载压力设计了一套甘蔗收获机切深自动控制系统。在其他作物入土深度以及耕深调节中研究较多。Timene等^[7]提出了一种用于拖拉机耕作作业的自适应神经模糊控制器的设计方案,允许模糊规则的产生,以抵消系统的非线性和扰动。Gao等^[8]提出了一种变论域模糊PID控制器(VUFPID)控制算法,以实现拖拉机耕深控制的快速调整。Nandong^[9]将反馈PID和前馈控制器结合起来,提出了一种新的设计反馈-前馈组合控制系统的系统方法。Zhou等^[10]等采用RTK-GNSS测量拖拉机实时高度和横滚角,并设计变增益单神经元PID控制算法。李博^[11]设计了一套微耕机耕深辅助控制系统,该系统主要由耕深检测装置、控制装置、执行装置和显示界面组成。熊成成等^[12]对木薯收获机挖掘深度进行自动控制,采用了仿形机构加积分分离式模糊PID,试验表明控制系统的误差为±0.5 cm。以上研

收稿日期: 2022-07-21

基金项目:湛江市科技发展专项(2020A01005);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1630132022001);湛江市科技计划项目重点实验室建设专题(2020A05004)

李腾辉, E-mail: 1348785278@qq.com

通信作者: 周德强, E-mail: zhoudeqiang@jiangnan.edu.cn

究中,作物入土深度控制以及耕深控制主要基于传统PID算法,由于传统PID算法不具备参数在线调整功能,当地面起伏较大时,难以产生良好的控制效果;采用传统模糊PID算法则由于参数确定过程中的人为因素,难以获得较好的控制参数,导致控制效果难以达到最佳。

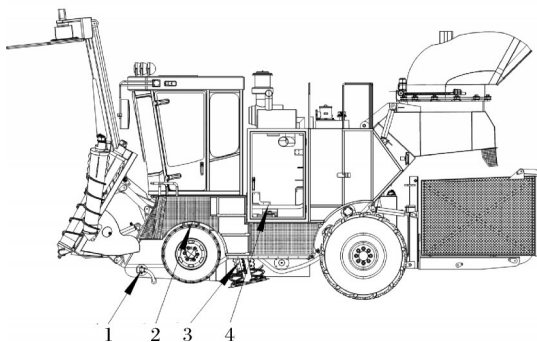
基于负载压力的深度检测方法需要对负载压力大小进行检测,因此需要将压力传感器安装在切割器上,收获机作业过程部分不可控因素会对传感器产生损坏。因此,其系统的稳定性较差。参考其他作物以及耕深控制研究,由于PID控制不具备参数的在线调整功能,控制精度较差。而模糊PID的参数需要人工进行微调,有很强的局限性。

本研究基于遗传算法优化的模糊PID,设计一套甘蔗收获机切割器自动控制系统,随着蔗地地形的变化对甘蔗收获机切割器入土深度进行自动调整,以期减少甘蔗的破头率,提高甘蔗收获效果,进一步提高甘蔗收获机智能化水平。

1 材料与方法

1.1 自动控制系统整体方案设计

在甘蔗收获作业过程中由于驾驶员视野被甘蔗叶遮挡,难以及时观察地表高低并对切割器的入土深度进行及时调整,导致甘蔗收获质量低,破头率较高。根据甘蔗收获机作业过程中机器自动调节切割器入土深度的需要,基于湛江某公司生产的4GQ-1型切段式甘蔗联合收获机,设计甘蔗收获机切割器入土深度自动控制系统。4GQ-1型甘蔗收获机总体结构组成如图1所示。

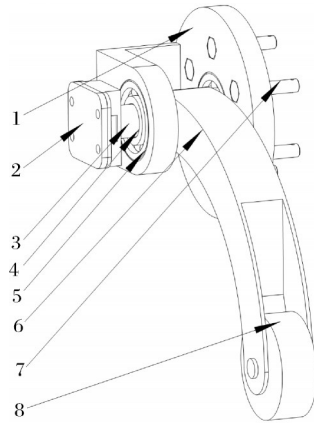


1. 仿形机构 Copying mechanism; 2. 液压油缸 Hydraulic cylinder; 3. 收获机切割器 Harvester cutter; 4. 电磁阀及其驱动模块 Solenoid valve and its driving module.

图1 4GQ-1型甘蔗收获机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of 4GQ-1 sugarcane harvester

仿形机构设计采用角度式,如图2所示^[13]。传动轴通过键与弯弧杆进行连接,角度传感器与传动轴采用一体化设计。当地面信息产生变化时,弯弧杆将会产生旋转,进而带动传动轴产生旋转,最终角度传感器检测到当前的角度信息。显示模块采用8.4寸工业触控一体机,实时检测控制系统的运行状态。按键模块主要为复位按键。



1. 连接板 Connect plate; 2. 角度传感器 Angle sensor; 3. 传动轴 Connecting shaft; 4. 滚动轴承 Rolling bearing; 5. 扭簧 Torsion spring; 6. 弯弧杆 Curved rod; 7. 连接螺栓 Connect the bolts; 8. 仿形轮 Profile wheel.

图2 角度仿形机构示意图

Fig.2 Schematic diagram of angle copying mechanism

当地面信息发生变化时,仿形机构将产生偏转并得到当前角度,控制器通过接收角度传感器的数据并通过 $H = \text{连接轴中心与仿形轮中心连接长度值} \times \cos\theta$ (θ 为角度传感器测量值)转换为高度信息,利用遗传算法优化的模糊PID算法通过继电器对电磁阀的开口和方向进行控制,进而达到切割器高度的自动调控。通过位移传感器测出液压缸的伸出量 H_1 ,进而实现闭环控制。由于甘蔗收获机有2个切割器,考虑到单个仿形机构难以精确测量到地面信息,因此设计了位于刀具两侧的2个仿形机构对地面高度信息进行检测。对2个仿形机构的数据取平均值作为控制系统的输入。控制系统原理图如图3所示。

1.2 甘蔗收获机切割器入土深度控制系统建模

甘蔗收获机入土深度自动控制系统主要包括液压执行元件、比例方向阀、传感器。先对各个环节分别进行建模,最后得出控制系统的数学模型。

1) 执行元件与被控对象。本研究的液压系统是典型的四通阀控非对称液压缸系统。液压缸可近似认为此系统只存在惯性负载。故液压缸与负载可视

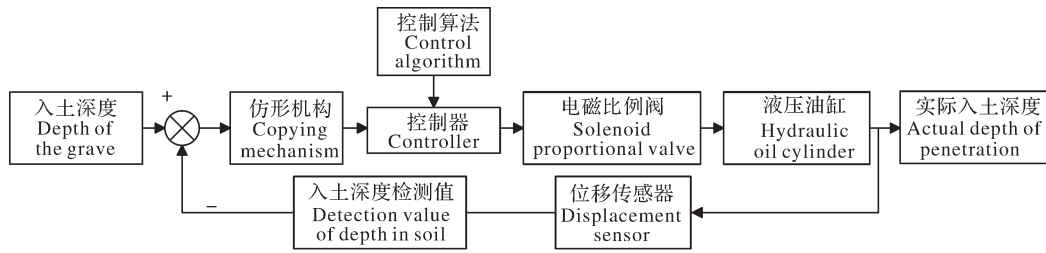


图3 控制系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of the control system

为积分环节与二阶环节的组合^[14]。其传递函数可表示为：

$$W_h(s) = \frac{K_h}{s(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h s}{\omega_h} + 1)} \quad (1)$$

式(1)中, K_h 为液压缸增益; ω_h 为液压系统的固有频率; δ_h 为液压系统的阻尼比。

2) 比例方向阀。工程实际中, 比例方向阀可视为一个二阶系统, 传递函数可表示为：

$$W_{pv}(s) = \frac{K_q}{s(\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\delta_v s}{\omega_v} + 1)} \quad (2)$$

式(2)中, K_q 为比例方向阀的流量增益; ω_v 为比例方向阀的相频宽; δ_v 为比例方向阀的阻尼比。

由上述可得控制系统的传递函数为：

$$G(s) = \frac{86.5}{1.9927 \times 10^{-10} s^5 + 1.1483 \times 10^{-7} s^4 + 4.8826 \times 10^{-5} s^3 + 0.0046 s^2 + s} \quad (4)$$

1.3 控制算法设计

1) 基本模糊PID。模糊控制中(表1), 输入输出变量大小以语言形式描述, 一般选用共7个词汇: {负大(NB), 负中(NM), 负小(NS), 零(ZO), 正小

$$G(s) = \frac{K_a K_v K_m \frac{1}{A_h}}{s(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h s}{\omega_h} + 1)(\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\delta_v s}{\omega_v} + 1)} \quad (3)$$

式(3)中, A_h 液压缸有效作用面积。 K_a 比例放大器增益; K_v 比例阀增益; K_m 传感器增益。

$\omega_h = \sqrt{\frac{K_h}{m}}$, 其中, K_h 为液压缸增益, m 为负载的

质量, 本系统质量约为 3 000 kg。 $K_h = \frac{3\beta_e A_1^2}{V} \beta_c$ 通常在 690~1 380 MPa, 本液压系统液压缸的缸径为 90 mm, 活塞杆直径为 60 mm, 液压缸的最大行程为 $L=340$ mm。由此可求出 $K_h = 3.873 2 \times 10^7$ 。进一步可以求出 $\omega_h = 160.658$ 。由传感器特性表可得 $\omega_v = 440$ 。因此, 系统的传递函数为：

(PS), 正中(PM), 正大(PB)}进行描述(表1), 所以论域设置为 7, 子集配置为: {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}^[15]。 e 和 e_c 的论域设置为 $[-3, 3]$ 。

表1 模糊规则

Table 1 Fuzzy rules

$\Delta K_p / \Delta K_i / \Delta K_D$	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PB	PB/NB/PB	PM/NM/PM	PM/NM/PM	PM/NM/PM	PB/NB/PB	PB/NB/PB
NM	PB/NB/PB	PB/NB/PM	PM/NM/PS	PM/NM/PS	PM/NM/PS	PB/NB/PM	PB/NB/PB
NS	PM/NM/PM	PS/NM/PS	PS/NS/ZO	ZO/NS/ZO	PS/NS/ZO	PM/NM/PS	PM/NM/PM
e_c	ZO	PM/NM/PM	PS/NM/PS	PS/NS/ZO	ZO/NS/ZO	PS/NM/PS	PM/NM/PM
	PS	PM/NM/PM	PM/NM/PS	PS/NS/ZO	PS/NS/ZO	PM/NM/PS	PM/NM/PM
	PM	PB/NB/PB	PB/NB/PM	PM/NM/PS	PM/NM/PM	PM/NB/PM	PB/NB/PB
	PB	PB/NB/PB	PB/NB/PB	PM/NM/PM	PM/NB/PM	PB/NB/PB	PB/NB/PB

对于比例系数 K_p , 当入土深度的误差 e 处于负大和正大水平时, 说明当前入土深度过浅或者过深而当入土深度过深则会增加切割器的磨损和收获机的功率损耗, 当入土深度过浅时则会导致甘蔗收获后破头率的增加, 此时应当给出较大的 K_p , 加快系统

的响应。当入土深度的误差 e 处于负中和正中时, 对应当前入土深度略低或略高于所设定的入土深度值。此时应当给出适中的 K_p , 从而避免响应速度过快而出现入土深度过大或过小。当误差 e 处于负小和正小时, 说明当前入土深度与目标值基本一致, 此

时切割器入土效果较好,可有效降低甘蔗破头率并减少损耗,应当使入土深度保持。此时应当给出较小的 K_P ,使入土深度保持在目标值附近。

对于积分系数 K_I ,当入土深度的误差 e 处于负大和正大水平时,此时应当给出较小的 K_I ,降低误差较大时积分的累加效应。当入土深度的误差 e 处于负中和正中时,对应当前入土深度略低或略高于所设定的入土深度值。

此时应当给出适中的 K_I ,减小比例环节所带来的余差,使入土深度尽快稳定。当误差 e 处于负小和正小时,此时应当给出较大的积分系数 K_I ,尽快减小系统的稳态误差。

对于微分系数 K_D , K_D 主要减小超调量以及克服振荡提高系统的稳定性,因此主要在误差 e 处于负小和正小时起作用,如果当前误差变化率 e_c 处于负大或正大时,给出较大的 K_D ,加快响应时间,减小振荡,使系统尽快稳定,如果当前误差变化率 e_c 处于负小或正小时,给出较小的 K_D ,保持系统的稳定。因此可得出模糊规则如表1所示。

利用重心法来进行解模糊,模糊推理所得的模糊量转变到准确量作用到模型^[16]。模糊PID的数学表达式如公式(5)所示。

$$\begin{cases} u(k) = K_P e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \\ K_P = K_{P0} + \Delta K_P \\ K_I = K_{I0} + \Delta K_I \\ K_D = K_{D0} + \Delta K_D \end{cases} \quad (5)$$

2)遗传算法优化模糊控制。模糊控制器中比例因子作为模糊控制器总增益,它的大小影响着控制器输出和控制系统的特性。一般比例因子增大,上升速率增大,超调量增大,响应时间减小,当比例因子过大时会导致超调量过大乃至振荡和发散,而比例因子过小,系统上升速率较小,快速性变差,稳态精度变差。由于模糊PID的比例因子通过计算得到后,在应用中往往无法得到较好的控制效果,还需要依靠人工经验进行微调,而人工微调存在很强的局限性且时间成本相对较高。

遗传算法具有全局搜索能力,可以求出优化问题的全局最优解,并且很容易应用到智能控制中参数和结构的寻优。因此,利用遗传算法对比例因子的最优解进行寻优。

适应度函数的计算是遗传算法运行的关键一环,对于算法的功能非常重要。综合考虑切割器入土深度自动控制系统的响应时间和超调量等因素,

选用时间乘绝对误差积分(integral of time and absolute error, ITAE)最佳性能指标作为适应度函数。其适应性函数可表示为:

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (6)$$

式(6)中: J 为ITAE性能指标; $e(t)$ 为绝对误差; t 为时间。

在确定适应度函数之后,通过对遗传算法的编码、选择、交叉、变异进行设定以得出最佳适应度的染色体。

①编码。遗传算法主要采用实数或二进制编码设定优化对象的字符串,编码方式选用实数编码。将模糊PID中的比例因子视为个体中的基因,系统不断进行在线参数寻优,优化模糊PID的性能。将模型中的3个变量构成一个编码字符串(K_P 、 K_I 、 K_D),这样的字符串即代表种群中1个个体,每个个体都是1个解,并根据设计变量的值域产生初始种群。

②选择、交叉、变异。选择操作主要为对父代的优异(适应度较大)个体进行选择并遗传到下一代。交叉操作主要是随机进行染色体的选择,再随机对染色体的基因进行调换。变异运算主要是将交叉运算接近最优解时,通过变异运算进行局部的随机搜索,以达到快速收敛和更高精度。选择概率 P_s 设定为0.8。交叉概率 P_c 设置为0.8,针对该系统将变异概率 P_m 设置为0.8。

遗传算法寻优流程如图4所示。遗传算法优化模糊PID原理图如图5所示。

2 结果与分析

2.1 仿真结果

利用MATLAB的Simulink工具进行甘蔗收获机切割器深度遗传算法优化的模糊PID控制策略的仿真,Simulink仿真模型如图6所示。

通过利用MATLAB的自整定工具箱进行优化后,设置PID的初始参数为 $K_{P0}=0.100\ 24$, $K_{I0}=0.141\ 40$, $K_{D0}=2.65 \times 10^{-5}$ 时,利用遗传算法对比例因子进行优化得到最优解为: $\Delta K_P=0.047\ 37$, $\Delta K_I=0.048\ 13$, $\Delta K_D=5.872\ 4 \times 10^{-6}$ 。模糊PID的初始参数与PID初始参数一致。通过Simulink得到经过遗传算法优化的模糊PID控制、模糊PID以及常规PID的系统输出阶跃响应曲线图和带随机干扰的阶跃响应曲线图,对比结果如图7和表2所示。

调节时间(响应时间)指响应达到并保持在终值2%或5%以内所需要的时间,本仿真采用2%。从

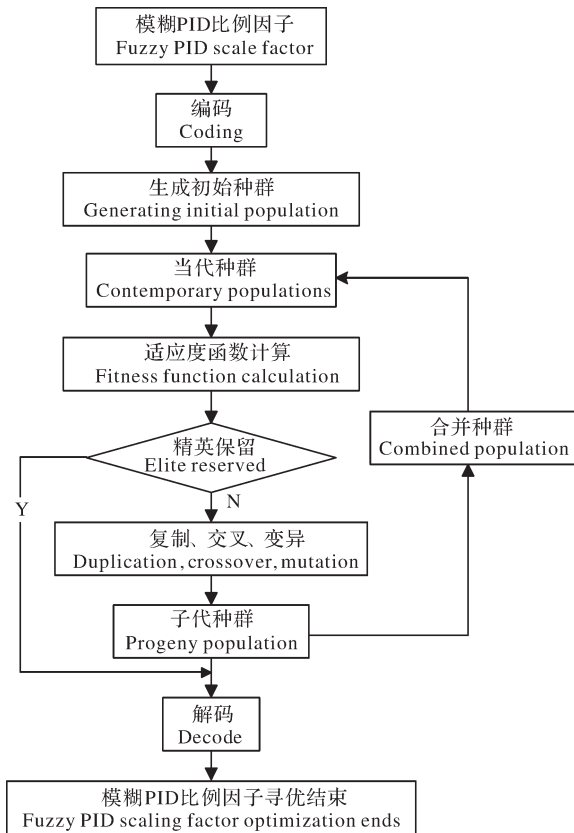


图 4 遗传算法寻优流程图

Fig.4 Optimization flow chart of genetic algorithm

表 2 和图 6 可以看出遗传算法优化的模糊 PID 的调节时间优于其他控制策略。超调量(控制精度)相比于 PID 降低了 52%;相比于模糊 PID 降低了 35%。在上升时间和峰值时间方面,遗传算法优化的模糊 PID 也优于其他的控制策略。带随机干扰的阶跃响应更加贴近实际作业情况。从随机信号的阶跃响应图(图 7B)可以看出,超调量远小于其他控制策略且调节时间相比于其他控制策略也有所减少。

表 2 阶跃响应控制策略结果对比

Table 2 Comparison of control strategy results

控制策略 Control strategy	超调量/% Overshoot amount	调节时间/s Adjusting time	峰值时间/s Peak time	上升时间/s Rise time
PID	10.3	1.589	0.509	0.260
模糊 PID Fuzzy-PID	7.5	1.622	0.498	0.255
GA-Fuzzy-PID	4.9	1.535	0.491	0.243

2.2 室内试验

室内台架试验平台包括试验台架、液压缸、液压工作站、模拟地面机构、甘蔗收获机切割器、STM32F103 控制器、继电器、仿形机构、MPU6050 传感器、超声波传感器等,如图 8 所示。为验证切割器入土深度自动控制系统的控制精度,开展了室内台架试验。其中模拟地面机构采用包括多曲面以及阶跃模块在内的模块化设计。试验控制对象为电磁阀,分别对常规 PID 控制算法、模糊 PID 控制算法、遗传算法优化的模糊 PID 控制算法进行切割器控制精度的测量以及验证。

将经过遗传算法优化的模糊 PID 控制、模糊 PID 以及常规 PID 的系统输出进行对比,结果如图 9 所示。常规 PID 控制算法中切割器随地面的起伏而变化的入土深度误差范围为(-1.5,1.5),且有较大滞后;模糊 PID 控制算法中切割器随地面的起伏而变化的入土深度误差范围为(-1.1,1.1)。基于遗传算法优化的模糊 PID 控制算法中切割器随地面的起伏而变化的入土深度误差范围为(-0.5,0.5),表明基于遗传算法优化的模糊 PID 控制策略优于模糊 PID 以及常规 PID 控制策略。

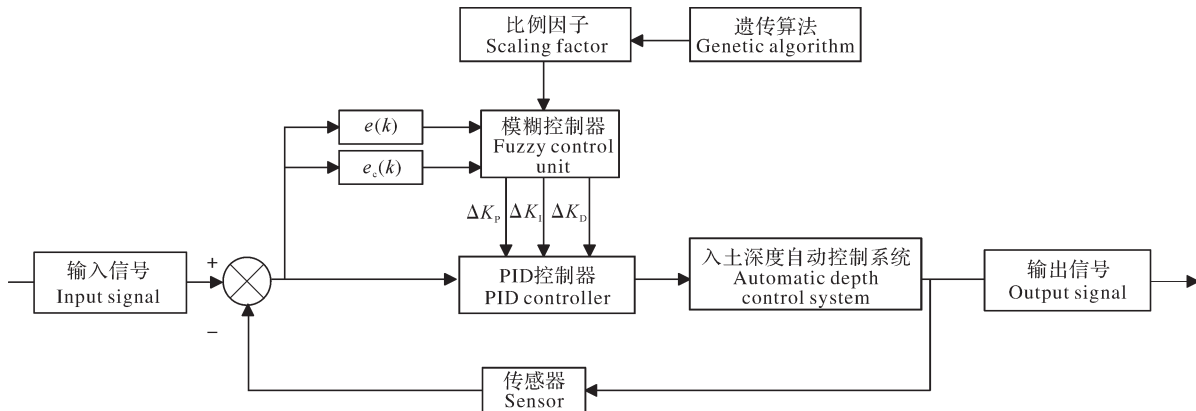


图 5 遗传算法优化模糊 PID 原理图

Fig.5 Schematic diagram of fuzzy PID optimization by genetic algorithm

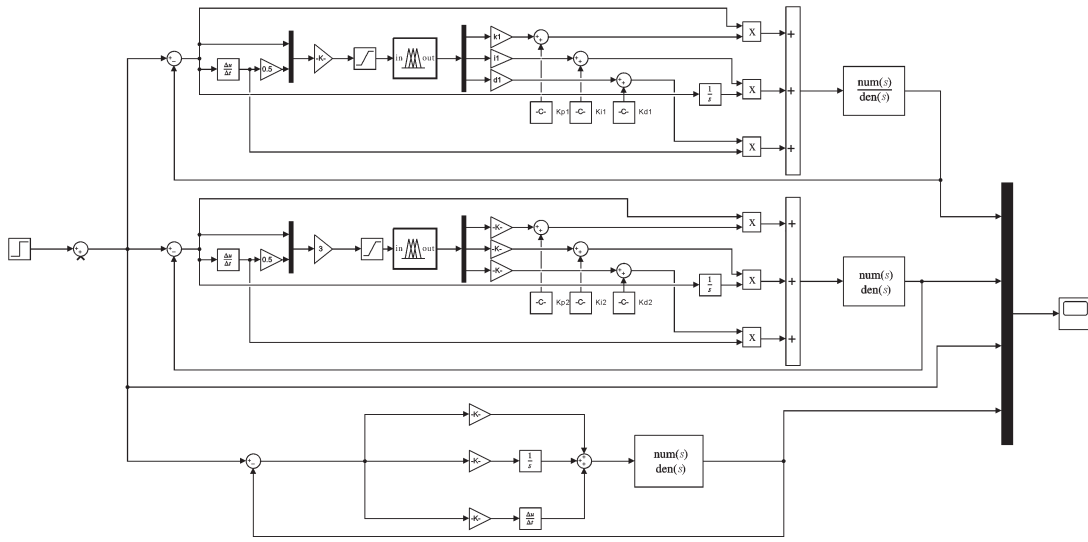
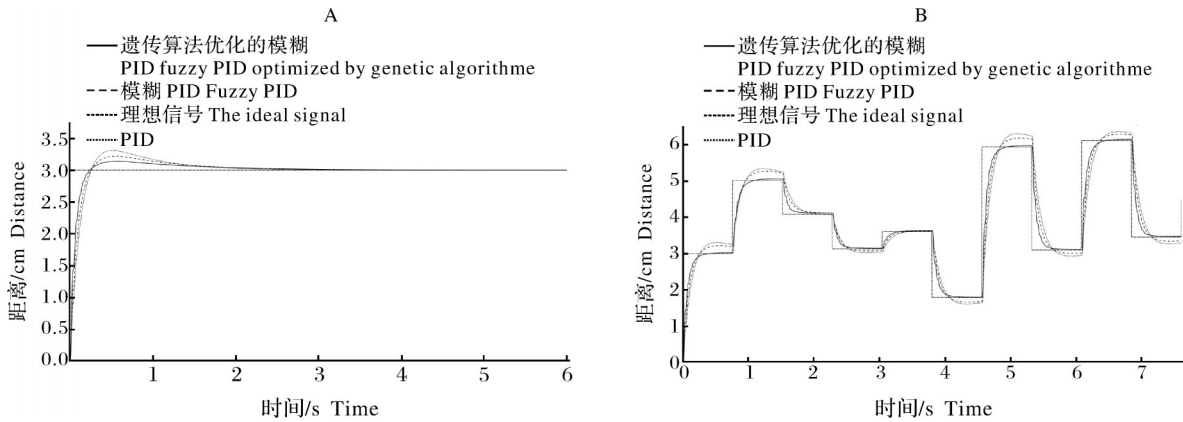


图6 Simulink模型

Fig.6 Simulink model



A: 阶跃响应 Step response; B: 带随机干扰的阶跃信号 Step signal with random interference.

图7 不同控制策略结果对比

Fig.7 Comparison of results of different control strategies



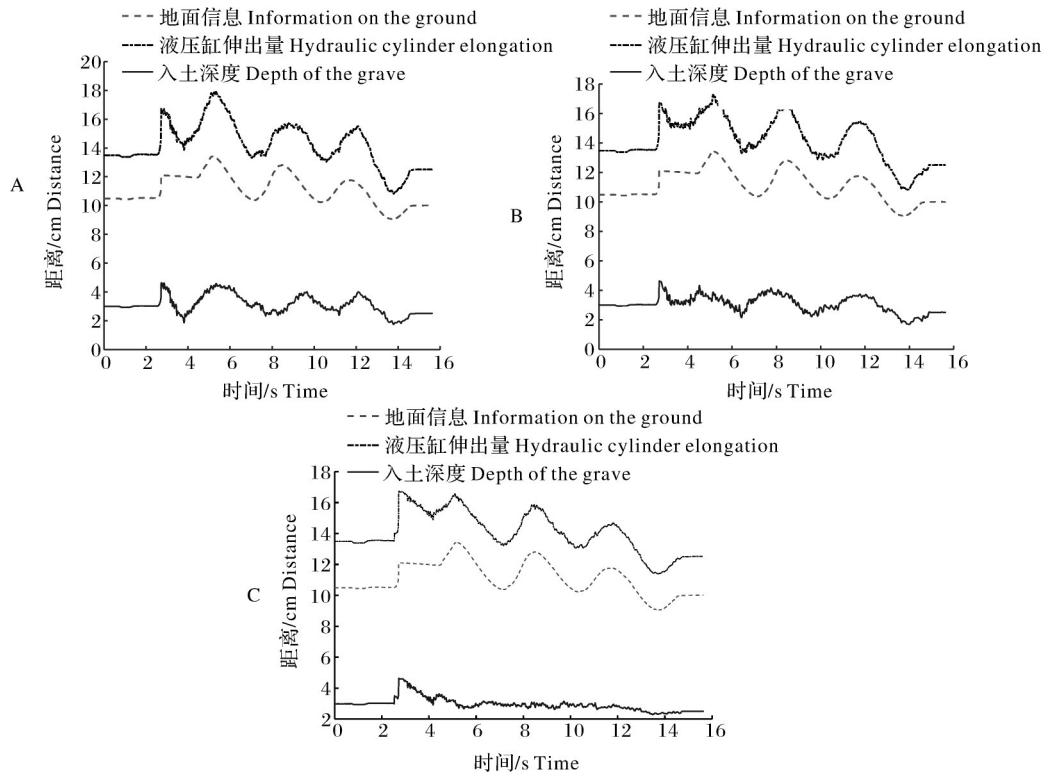
1. 试验台架 Test bench; 2. 液压油缸 Hydraulic cylinder; 3. 切割器 Cutter; 4. 液压站 Imitation ground mechanism; 5. 工控系统 Industrial control system; 6. 仿形机构 Imitation mechanism; 7. 仿地面机构 Imitation ground mechanism.

图8 室内试验设备

Fig.8 Diagram of laboratory test equipment

3 讨论

针对目前甘蔗收获机切割器入土深度无法进行自动调节,造成破头率较高、收获质量较差、能耗较大的问题,采用基于遗传算法优化的模糊PID控制算法、仿形机构以及单片机控制器相结合的方式设计了一套甘蔗收获机切割器入土深度自动控制系统。Simulink的仿真对比结果显示,常规PID算法超调量为10.3%,调节时间为1.589 s;模糊PID算法超调量为7.5%,调节时间为1.622 s;基于遗传算法优化的模糊PID算法超调量为4.9%,调节时间为1.535 s。室内试验结果表明,常规PID控制算法误差范围为(-1.5,1.5);模糊PID控制算法误差范围为(-1.1,1.1);基于遗传算法优化的模糊PID控制算



A:PID响应曲线 PID response curve; B:模糊PID响应曲线 Fuzzy PID response curve; C:遗传算法优化的模糊PID响应曲线 Fuzzy PID response curve optimized by genetic algorithm.

图9 室内试验结果对比

Fig.9 Diagram of laboratory test results

法误差范围为 $(-0.5, 0.5)$ 。Simulink算法仿真以及室内试验结果表明基于遗传算法优化的模糊PID控制效果明显优于模糊PID控制算法以及常规PID控制算法,且可以满足控制要求,实现了切割器入土深度实时监测以及精确控制,提高了4GQ-1型甘蔗收获机智能化水平。由于本研究尚处于室内台架试验阶段,试验台架受限,仿形机构还未达到最优。后续进行田间试验可以考虑将仿形轮改为双轮式,以减小在田间不确定地形的测量误差,从而获得更高的控制精度。

参考文献References

- [1] 赖晓,秦志文,张彪,等.甘蔗收割机切刀入土切割压力影响因素的试验分析[J].装备制造技术,2016(11):6-8,17.LAI X, QIN Z W, ZHANG B, et al.Experimental research on the effect factors of the underground cutting pressure of the sugarcane harvester base cutter[J].Equipment manufacturing technology, 2016(11):6-8,17 (in Chinese with English abstract).
- [2] 麻芳兰,滕筱,李科,等.甘蔗收获机切割器入土深度自动控制系统设计及试验[J].中国农机化学报,2021,42(4):1-7.MA F L, TENG X, LI K, et al.Design and experiment of an automatic control system of soil depth of sugarcane harvester cutter[J].Journal of Chinese agricultural mechanization, 2021, 42(4):1-7 (in Chinese with English abstract).
- [3] 麻芳兰,罗晓虎,李科,等.基于正则化TSVR的甘蔗收割机切割器入土切割负载压力预测研究[J].中国农机化学报,2021,42(2):8-14,24.MA F L, LUO X H, LI K, et al.Prediction of load pressure of cutter of sugarcane harvester based on regularized TSVR [J].Journal of Chinese agricultural mechanization, 2021, 42(2):8-14, 24 (in Chinese with English abstract).
- [4] 蔡力,麻芳兰,钟家勤.甘蔗收获机切刀负载压力的神经网络预测[J].农机化研究,2022,44(6):36-40.CAI L, MA F L, ZHONG J Q.Neural networks prediction of cutter load pressure of sugarcane harvester [J].Journal of agricultural mechanization research, 2022, 44(6):36-40 (in Chinese with English abstract).
- [5] 麻芳兰,李科,罗晓虎,等.不同土壤对甘蔗入土切割负载压力影响的研究[J].农机化研究,2022,44(1):165-173.MA F L, LUO X H, LI K, et al.Study of different soils on the load pressure of sugarcane cutting [J].Journal of agricultural mechanization research, 2022, 44(1):165-173 (in Chinese with English abstract).
- [6] 李凯华,王增,麻芳兰.基于PLC的甘蔗收割机切深控制系统[J].装备制造技术,2016(8):1-6.LI K H, WANG Z, MA F L. The research on a cutting depth control system for a sugarcane harvester based on PLC [J].Equipment manufacturing technology, 2016(8):1-6 (in Chinese with English abstract).
- [7] TIMENE A, NGASOP N, DJALO H. Tractor-implement tillage depth control using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)[J].Proceedings of engineering and technology innova-

- tion, 2021, 19: 53-61.
- [8] GAO Q, LU Z X, XUE J L, et al. Fuzzy-PID controller with variable universe for tillage depth control on tractor-implement [J]. Journal of computational methods in sciences and engineering, 2021, 21(1): 19-29.
- [9] NANDONG J. A unified design for feedback-feedforward control system to improve regulatory control performance [J]. International journal of control, automation and systems, 2015, 13(1): 91-98.
- [10] ZHOU M K, XIA J F, ZHANG S, et al. Development of a depth control system based on variable-gain single-neuron PID for rotary burying of stubbles [J/OL]. Agriculture, 2021, 12(1): 30 [2022-07-21]. <https://doi.org/10.3390/agriculture12010030>.
- [11] 李博. 微耕机耕深自动控制系统的设计与研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015. LI B. Design and research on micro tillage machine-cultivated depth automatic control system[D]. Chongqing: Southwest University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [12] 熊成成, 周德强, 邓干然, 等. 振动链式木薯收获机挖掘深度自动控制系统设计与测试[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(2): 217-226. XIONG C C, ZHOU D Q, DENG G R, et al. Design and test of automatic control system for excavation depth of vibrating chain cassava harvester[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(2): 217-226 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张亮. 甘蔗联合收割机刀盘仿形随动控制系统的设计与研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014. ZHANG L. Study and design of cutting platform following control system of combined sugarcane harvester[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [14] 汪首坤. 液压控制系统[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016. WANG S K. Hydraulic control system[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016 (in Chinese).
- [15] 孙嘉梁, 符晓. 遗传算法优化的移相全桥变换器模糊PID控制[J]. 测控技术, 2022, 41(5): 113-118. SUN J L, FU X. Fuzzy PID control of phase shift full-bridge converter optimized by genetic algorithm[J]. Measurement & control technology, 2022, 41(5): 113-118 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李士勇. 模糊控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2011. LI S Y. Fuzzy control[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2011 (in Chinese).

Control system of sugarcane harvester cutter based on fuzzy PID optimized by genetic algorithm

LI Tenghui¹, ZHOU Deqiang^{1,2}, HE Fengguang³, DENG Ganran³,
CUI Zhende³, WANG Xiang⁴, CHEN Zihong³

1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment
Technology, Wuxi 214122, China;

3. Institute of Agricultural Machinery, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/
Key Laboratory of Agricultural Equipment for Tropical Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/
Guangdong Provincial Research Center for Precision Emission Control of Agricultural Particulates/
Zhanjiang Key Laboratory of Particle Dynamics and Precision Control, Zhanjiang 524091, China;

4. Leizhou Leibao Machinery Co., LTD., Zhanjiang 524200, China

Abstract A set of automatic control system of sugarcane harvester cutter was designed to solve the problem that the sugarcane harvester cutter cannot automatically control the depth of cutting device, which affects the quality of harvest. The system mainly included angle profile mechanism, depth detection system, hydraulic system and control system. The fuzzy PID control algorithm optimized by genetic algorithm was used to adjust the depth of the soil in real time through Simulink step response and step response with random interference simulation. The results showed that the overshoot of fuzzy PID control algorithm optimized by genetic algorithm was 4.9%. The adjustment time was 1.535 s, being improved compared with PID control algorithm and fuzzy PID control algorithm. The results of comparing laboratory test showed that the error of fuzzy PID control algorithm optimized by genetic algorithm was $(-0.5, 0.5)$, which was the smallest, indicating that it automatically control the depth of the cutter effectively.

Keywords sugarcane harvester; genetic algorithm; fuzzy PID; depth detection; copying institutions; intelligent agricultural machinery

(责任编辑:陆文昌)