

甘蔗收获机割台随动控制系统设计与试验

宫元娟¹ 金忠博¹ 白晓平² 王思佳¹ 吴玲¹ 黄婉媛¹

(1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110169)

摘要: 针对国内现有甘蔗收获机无法对割台高度实施自动控制的问题,设计了一种割台随动控制系统。系统由自重摆动式仿形机构、STM32 控制器、位移传感器、上位机模组、按键模块、电磁阀及驱动模组组成。自重摆动式仿形机构与地面直接接触并保持贴附,实时检测收获作业时的地面起伏变化,同时可以依靠仿形机构外廓曲面减小收获机倒退时地面对自身关键部件的冲击。建立割台高度控制参数模型,运用 PID 控制算法,有效地实现收获机割台高度的精确控制,进一步提升了甘蔗收获机自动化水平和工作性能。田间试验结果表明,收获机在安装割台随动控制系统后,割台随地形起伏变化而变化,使破头率降低,平均破头率为 21%,通过与人工控制收获试验对比,平均破头率下降 18.5 个百分点。

关键词: 甘蔗收获机; 割台高度; 仿形机构; 自动控制; 地形检测

中图分类号: S225.5⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)02-0119-10 OSID: 

Design and Experiment of Servo Control System for Sugarcane Header

GONG Yuanjuan¹ JIN Zhongbo¹ BAI Xiaoping² WANG Sijia¹ WU Ling¹ HUANG Wanyuan¹

(1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China)

Abstract: Directing at the problems that domestic sugarcane harvester header height adjustment and nonautomatic control, a servo control system for sugarcane header height was designed. The servo control system mainly consisted of a self-weight swinging profiling mechanism, STM32 controller, displacement sensor, upper computer module, keypad module, solenoid valve drive module, etc. The self-weight swinging profiling mechanism consisted of a ground contact, a connection sleeve, a left fixed connection plate, a frame, a right fixed connection plate, an angle sensor, etc. To address the problem that the harvester may cause impact or destroy the profiling mechanism when performing the reversing operation, ADAMS dynamics simulation software was utilized to obtain the vertical height and force variation of the profiling mechanism, and complete the optimization design of the tail end of the profiling mechanism. The simulation tests showed that when the radius of the tail end was 105 mm, the maximum collision force of the ground on the profiling mechanism was equal to 1 976 N less than the permissible bending strength of 45 steel, which met the design requirements of the profiling mechanism. It was also verified that the profiling mechanism can adhere to the ground. To study the relationship model between the height of the harvester's cutting table and the signals collected by the profiling mechanism, and design a PID algorithm for cutting table height control. The PID control algorithm was optimized by using Matlab/Simulink software. After tuning the calculation optimization, when the proportional coefficient K_p was 0.41, the integral coefficient K_i was 0.76 and the differential coefficient K_d was 0.009, the PID controller met the requirements of the servo control system. The profiling mechanism sent the detected terrain height data to the STM32 control unit, and after analysis and processing, the hydraulic actuators were driven to control the lifting and lowering of the cutting table. After completing the design of the cutting table servocontrol system, it was installed on a 4GZQ130-A sugarcane harvester for functional tests. The driver started the

收稿日期: 2022-05-19 修回日期: 2022-07-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1709600)、辽宁省重点研发计划项目(2020JH2/10200026)和中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-ST-S-QYZD-198)

作者简介: 宫元娟(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事农业生物系统智能装备研究,E-mail: yuanjuangong@163.com

通信作者: 白晓平(1986—),男,副研究员,博士,主要从事农业机械导航控制研究,E-mail: baixiaoping@sia.cn

machine, activated the cutting table servo control system for harvesting, set the cutting height, harvested three monopoles, observed the stubble height at each harvest, recorded the test data, measured the distance from the ground to the cut point of the cane and calculated the head breakage rate. The test results showed that after the 4GZQ130 - A sugarcane harvester was fitted with a cutting table follower control system, the stubble height deviated from the preset stubble height within 20 mm, an average head breakage rate was 21%. In comparison with the manually controlled harvesting trials, the average head breakage rate was reduced by 18.5 percentage points. The harvester's performance was further improved and the overall performance of the cutting table follower control system met the design and use requirements.

Key words: sugarcane harvester; header height; profiling mechanism; automatic control; terrain detection

0 引言

甘蔗是一种广泛种植于我国南部的宿根类作物^[1-2],收获作业后留在蔗桩上的蔗芽在适宜的温湿条件下可以萌芽出新苗继续生长。我国虽是甘蔗种植大国,但机械化收获率和收获质量并不高,且甘蔗收获机智能化水平偏低,关键部件及技术存在瓶颈,致使宿根破头率增高,影响作物翌年出芽率,严重制约着我国蔗糖产业发展^[3-6]。综上,提高甘蔗收获机自动化、智能化水平,降低宿根破头率,提高收割质量^[7-8],对保障我国战略原料安全具有重要意义。

甘蔗收获机工作时主要包括扶禾、压倒、切割、切断、输送及切梢等环节,在实际生产工作过程中,切割环节是最难控制的工序之一^[9-10]。甘蔗收获机工作时的割台高度是影响收获质量和宿根破头率的关键参数,割台过高,会使破头率增高,降低收获质量和作物产量;割台过低,会对收割机及割台关键部件造成一定损害^[11-12],严重影响收获效率,且容易伤害作物宿根,使作物无法正常生长,造成生产成本增加和劳动强度增大。割台高度控制技术主要有4种:机械式、电液式、自动控制式和图像采集式。目前国外用于甘蔗种植的土地面积大、坡度小且平坦,对于割台高度自动控制的要求不高,对该方面研究较少,具有割台高度控制功能的收获机不适用于我国国情,在国内应用较少^[13]。而目前国内甘蔗收获机以机械式割台高度控制技术为主,即采用平行四杆机构控制割台高度,可根据实际使用需求人为任意调节收割装置距离地面的高度,但机械式平行四杆机构实时仿形精度低、控制稳定性也较差。其他种类都处于研发阶段,文献[14]基于非接触式红外光电传感器,在碧浪4LZ-1.2型履带自走式联合收获机上设计安装了一种割台高度自适应调节系统,但光电传感器易受到灰尘、杂草及复杂工作环境的影响,造成检测结果不准确,且未进行田间试验,

相关试验数据不充足。文献[15]设计了一种甘蔗收割机刀盘浮动控制系统,通过角位移传感器配合改进的新型液压系统来调整割台高度,但缺少整机测试数据,仅停留在理论阶段。文献[16]提出了一种基于图像处理技术的倒伏小麦检测方法,根据摄像头采集的图像实现割台高度的控制,但摄像头易受田间复杂环境影响,造成检测结果不准确。综上,我国甘蔗收获机所采用的这些割台高度控制技术不能满足实际生产需求,亟需改进和突破。

针对国内现有甘蔗收获机割台高度无法自动控制和收获后破头率高等问题,本文基于广西农业机械研究院有限公司的4GZQ130-A型甘蔗收获机设计一种割台随动控制系统,所设计的自重摆动式仿形机构可以不依赖外力贴附于地表行走,且可依靠外廓曲面减小收获机倒退时地面对自身的冲击,建立收获机割台高度与传感器信号间的数学模型,基于PID控制理论设计割台高度控制方法,完成割台随动控制系统软件设计,综合运用传感器和单片机控制技术,实现对地面高度的实时监测和收获机割台高度的自动控制。

1 割台随动控制系统整体方案设计

为了实现收获机割台高度的自动控制,降低收获机在生产过程中的破头率,设计了甘蔗收获机割台随动控制系统。随动控制系统包括手动控制和自动控制两种工作模式,驾驶员可以根据实际使用需求通过按键切换工作模式。手动控制是驾驶员根据工作经验通过操作手柄对割台高度实施控制;自动控制则是在收获机工作过程中,根据地面起伏变化甘蔗收获机自动完成对割台高度的调控。

1.1 系统总体结构

甘蔗收获机割台随动控制系统总体结构如图1所示。主要由自重摆动式仿形机构、STM32控制器、位移传感器、上位机模组、按键模块、电磁阀及驱动模组组成。

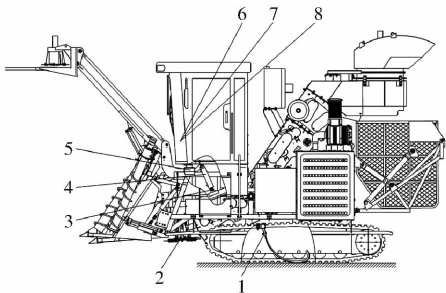


图 1 甘蔗收获机割台随动控制系统结构示意图

Fig.1 Schematic of servo control system of sugarcane header

1. 自重摆动式仿形机构 2. 割台 3. 位移传感器 4. 液压缸
5. 电磁阀及驱动模组 6. STM32 控制器 7. 上位机模组 8. 按键模块

自重摆动式仿形机构安装于车体底部,通过机械结构与地面直接接触并贴合,随地面起伏变化而摆动,因甘蔗种植过程中需要二次培土,且垄台较宽,为避免单个仿形机构无法准确检测割台距离地面的高度,在同一直线上均布设置了 3 个仿形机构用于检测地形变化趋势,仿形机构将采集到的地面高度变化数据转换为电信号传输至控制系统。位移传感器采用 WXXY 公司的 WXY31 系列产品,精确度较高,通过标定试验确定液压缸伸长量与割台高度的比例关系,将采集到的液压执行部件的伸缩量转换为电信号输入控制系统。STM32f4 系列单片机作为主要控制单元,具有较强的数据处理功能,能够满足使用需求^[17-19]。上位机模组采用 10.1 英寸 LCD 液晶显示屏,方便驾驶员设置有关割台高度控制的相关参数及实时监测随动控制系统的工作状态。割台高度执行部件采用液压控制技术,主要由液压缸、电磁阀及驱动模组组成。割台随动控制系统组成如图 2 所示。

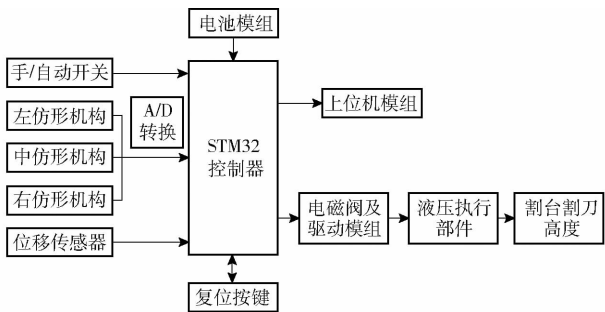


图 2 割台随动控制系统构成图

Fig.2 Composition diagram of cutting table servo control system

1.2 系统工作原理

割台随动控制系统工作原理图如图 3 所示,驾驶员将工作模式调整为自动控制模式,启动割台随动控制系统并开始执行收获作业,仿形机构实时检测地面起伏变化,将角度传感器所采集到的电信号

传递给控制系统,控制系统根据控制算法输出电磁阀控制信号,驱动液压缸工作并带动割台刀盘上下浮动,控制割刀距离地面的高度,同时安装在液压缸上的位移传感器将液压缸的伸缩量信息在一定时间内反馈给控制器,控制器根据实时检测的信号来判断割台刀盘距地面高度是否达到控制要求,上述工作流程构成割台高度控制的闭环系统,保证割台高度的精确控制。

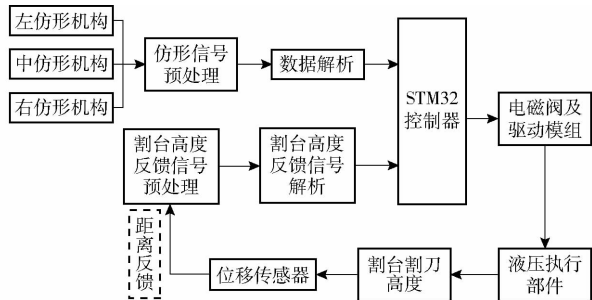


图 3 随动控制系统工作原理图

Fig.3 Principle picture of servo control system

2 随动控制系统检测部件设计

2.1 自重摆动式仿形机构设计

根据前期的研究及对仿形机构的设计可知,图 4 所示滚轮式侧位仿形机构,其优点在于结构简单,但易生锈,在工作一段时间后需要频繁更换扭簧及其他零部件,若长时间工作会因蔗地的潮湿环境使泥土附着在表面,并随时间的增长而增加,使采集的地面高度信息不准确,降低仿形精度,甚至导致仿形失效。



图 4 滚轮式侧位仿形机构

Fig.4 Roller type lateral profiling mechanism

为了解决此问题设计了一种自重摆动式仿形机构,主要由触地部件、连接套筒、左固定连接板、机架、右固定连接板及角度传感器等组成,如图 5 所示,其主要作用是对地垄表面进行仿形,实时检测地面起伏变化信息并传递至控制器。

自重摆动式仿形机构在自重的作用下贴附于地面,随地面的起伏变化而动作,带动连接套筒转动;角度传感器通过连接套筒的花型孔与之紧密相连,

控制器通过判断连接套筒的旋转角度,计算并解析数据驱动电磁阀及驱动模组动作,以实现割台高度的自动调控。

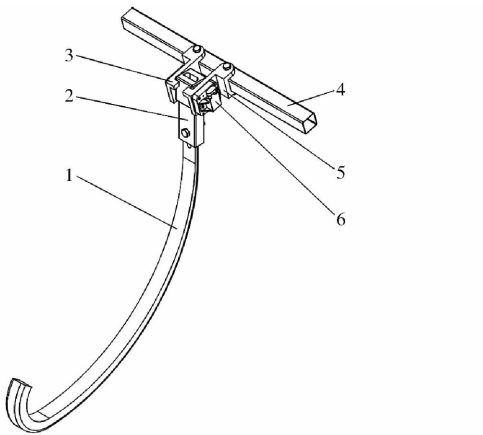


图 5 自重摆动式仿形机构示意图

Fig. 5 Sketch map of self-weight swinging profiling mechanism

1. 触地部件 2. 连接套筒 3. 左固定连接板 4. 机架 5. 右固定连接板 6. 角度传感器

滚轮式侧位仿形机构中的橡胶轮为关键部件,整体呈圆形,使用初期可以为控制器提供较平滑稳定的地面高度变化信息,基于此,自重摆动式仿形机构的关键部件亦可设计为圆弧形并可加大圆弧半径使所采集数据曲线更为平滑,由原有的滚动摩擦更改为滑动摩擦,所产生的摩擦力会大大降低泥土附着在关键部件的可能性。

图 6 为自重摆动式仿形机构原理图。图中 O 为仿形机构回转中心; L 为仿形机构理论廓线圆心至点 O 的距离; R 为仿形机构理论廓线半径; H 为初始地面高度; θ_0 为仿形机构初始角度。

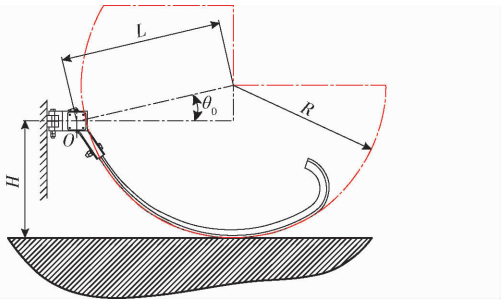


图 6 自重摆动式仿形机构原理图

Fig. 6 Schematic of self-weight swinging profiling mechanism

因所试验样机的仿形机构的机架位置距离地面高度为 610 mm,为了适应甘蔗收获机实际工作情况,仿形机构中的触地部件作为关键部件,整体采用圆弧结构,直径为 206 mm,宽度为 45 mm。为了防止触地部件损坏,触地部件材料选用 45 钢,密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

对触地部件的危险截面所能承受的最大弯曲应

力进行计算,验证所设计宽度是否合理,触地部件的危险截面为矩形,宽度 b 为 45 mm,高度 h 为 25 mm。

查阅《机械设计手册》,45 钢的许用弯曲应力 $[\sigma_w]$ 为 270 MPa,弯曲强度计算公式为

$$\sigma_w = \frac{M_w}{W_z} = \frac{F_2 L_f}{bh^2} \leq [\sigma_w] \tag{1}$$

式中 σ_w ——弯曲应力,MPa
 M_w ——仿形机构所受弯矩, $\text{N} \cdot \text{mm}$
 W_z ——抗弯截面系数
 F_2 ——倒车时地面对仿形机构的最大碰撞力,N
 L_f ——碰撞力到仿形机构矩心的距离,mm

计算得出倒车时地面对仿形机构的最大碰撞力 $F_2 \leq 2\,260 \text{ N}$,满足设计要求,该结果可为后续仿真试验提供参考。

自重摆动式仿形机构上端通过螺栓与收获机相连接,整体位置可根据实际使用需求调整。连接套筒通过轴承与左、右固定连接板连接,触地部件上端有一排间距相等的垂直通孔与连接套筒的单个孔配合,采用螺栓连接,调整方便,以适应不同地面的收获需求及不同的机架高度。触地部件随地面起伏变化而运动,带动连接套筒在固定连接板前端的梯形块限制下做圆周运动。为保证角度传感器的检测结果精确,利用花型孔结构将连接套筒与角度传感器固定,角度传感器将地面起伏变化信息传递至控制器。自重摆动式仿形机构可以依靠自身的机械结构始终保持整体机构重心处于末端,使触地部件与地面紧密贴附,同时其尾端结构也可以适应地形状况,在执行倒车操作时,避免地面对仿形机构产生冲击及破坏。

图 7 为仿形机构工作示意图,假设以速度 v 向前运动,仿形机构的触地部件沿着垄面由点 A 运动至点 B ,仿形机构绕着回转中心 O 转动, A 、 B 两点的垄面高度变化值为 H_2 ,仿形机构角度变化值为 $\Delta\theta$;同时,触地部件与垂直面间的夹角从 θ_1 变化为 θ_2 ,则 A 、 B 两点处仿形机构安装点距垄面的高度 H_0 、 H_1 与转角 θ_1 、 θ_2 的关系为

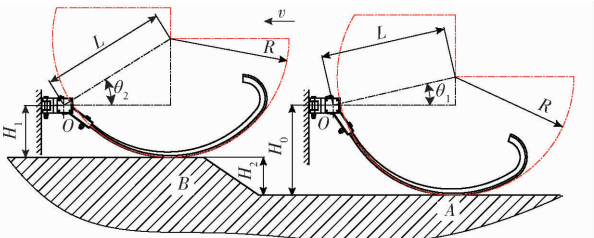


图 7 仿形机构工作示意图

Fig. 7 Working diagram of profiling mechanism

$$\begin{cases} H_0 = R - L\sin\theta_1 \\ H_1 = R - L\sin\theta_2 \end{cases} \quad (2)$$

垄面高度变化量 H_2 和仿形机构角度变化量为

$$\begin{cases} H_2 = H_0 - H_1 = L(\sin\theta_2 - \sin\theta_1) \\ \Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 \end{cases} \quad (3)$$

理论廓线的圆心距仿形机构回转中心点 O 的长度为理论廓线半径 L , 因此 $L = 103\text{ mm}$, 由此可得 H_2 为

$$H_2 = H_0 - H_1 = 103(\sin\theta_2 - \sin\theta_1) \quad (4)$$

当 $\theta_2 > 0^\circ$, $\theta_1 < \theta_2$ 时, $H_2 > 0$, 表明地垄高度升高, 则需要增大收获机割台距垄面高度; 当 $\theta_2 < 0^\circ$,

$\theta_1 > \theta_2$ 时, $H_2 < 0$, 表明地垄高度下降, 则需缩小收获机割台距垄面高度。

2.2 角度传感器选型

角度传感器采用 Elobau 公司的 424A 型传感器, 采用霍尔原理的非接触式测量, 使用寿命长且可靠, IP67 防护等级, 适用于恶劣的工作环境。可以检测 $30^\circ \sim 120^\circ$ 的角度变化, 并将其转换为 $0 \sim 5\text{ V}$ 的模拟电压, 经过处理后输入 A/D 转换电路, 如图 8 所示, 可实现 8 路 $0 \sim 10\text{ V}$ 模拟电压信号的 A/D 转换, 最后直接输出至控制器中的微型处理器进行数据处理。

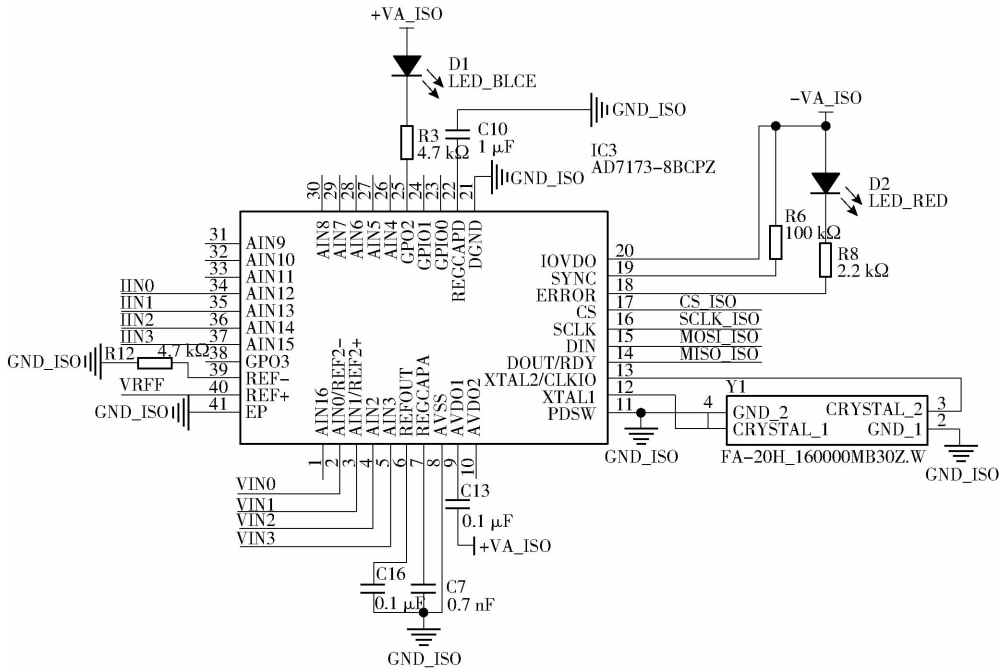


图 8 A/D 转换电路

Fig. 8 A/D conversion circuit

2.3 基于 ADAMS 仿真的自重摆动式仿形机构优化设计

仿形机构能否正常工作直接关系到地形高度检测是否精准, 为了使仿形机构适应复杂的田间环境, 对其受力情况和工作过程进行分析, 仿形机构的受力分析如图 9 所示。图中 O_1 为仿形机构矩心; F 为固定连接板对仿形机构的支持力, N ; G 为仿形机构重力, N ; F_1 为地面的支持力, N ; f_1 为前进时地面对仿形机构的摩擦力, N 。

仿形机构在工作过程中, F_1 会受田间复杂环境影响而不断变化, 在不施加外力的作用下, 若所设计的仿形机构的机械结构不能很好适应地表的起伏变化, 仿形机构则会产生抖动, 导致检测信号不稳定, 致使检测失效; 此外, 甘蔗收获机割台可提供安装仿形机构的盈余空间远远小于其他各类型收获机, 仿形机构只能安装于割台后侧, 因此甘蔗收获机在执

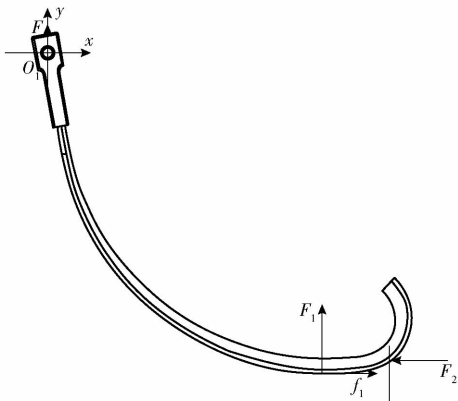


图 9 仿形机构受力分析

Fig. 9 Force analysis diagram of profiling mechanism

行倒车操作时, 仿形机构不能随割台向上抬起, 若 F_2 过大会对仿形机构造成冲击或者损坏, 严重影响仿形精度。为验证所设计的仿形机构可以依靠自重紧贴附于地面行走并确定合适的尾端半径, 利用

ADAMS/View 软件对其运动过程进行仿真分析。

在仿真试验开始前,对仿形机构进行简化,以提高试验效率^[20-22]。利用 SolidWorks 按照 1:1 比例建立简化三维模型,保存为 X_T 格式并导入 ADAMS/View。简化后的模型主要包括左固定连接板、连接套筒、右固定连接板、触地部件、横梁及仿真地面。

将三维模型导入后根据实际使用情况设置相关仿真参数及添加约束关系,以保证试验结果准确。触地部件选用 45 钢,其他零部件材料均设置为普通碳钢。仿真地面材料为土壤,密度 $7.8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$,泊松比 0.29,弹性模量 $2.07 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ^[23]。分析各零件之间的运动关系,利用旋转副实现触地部件于左、右固定连接板之间的旋转运动;利用滑移副和滑移驱动实现仿形机构的水平前进运动;利用固定副将仿真地面与大地 (ground) 固定,并在仿形机构与仿真地面间建立接触约束以实现仿形机构的运动过程^[24-25]。仿真模型如图 10 所示,仿真之前利用 ADAMS/View 中的 Model Verify 工具对模型进行验证,对自由度、未定义构件以及过约束等情况进行观察,若有错误方便进行修改。

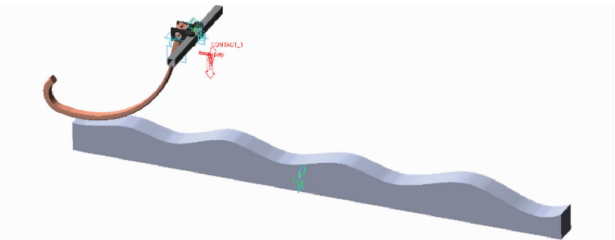


图 10 仿形机构工作过程仿真模型
Fig. 10 Simulation model of working process of profiling mechanism

为了验证仿形机构可以依靠自重与地面保持稳定接触,并为控制器提供稳定的地面变化数据,试验以仿形机构前进速度为影响因素,根据甘蔗收获机作业时常用前进速度,选择 1.0 km/h (278 mm/s)、1.5 km/h (417 mm/s)、2.0 km/h (550 mm/s) 共 3 个水平,以仿形机构的前进方向为 X 轴正向,以垂直

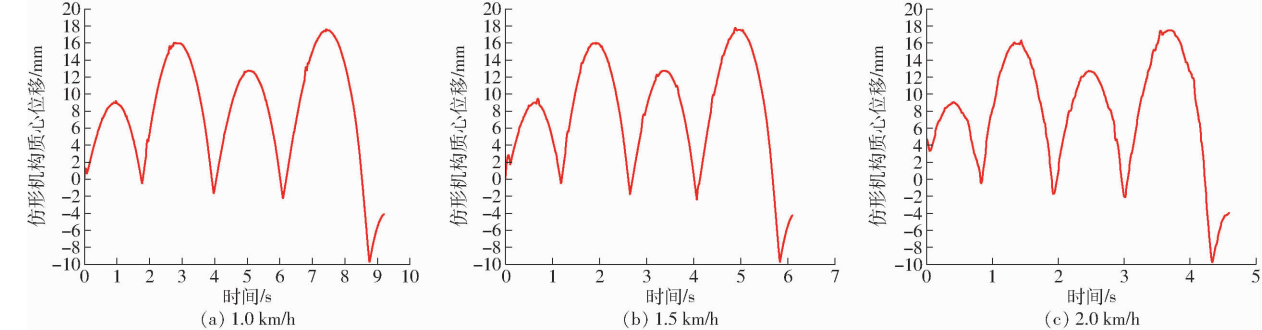


图 11 不同前进速度对仿形机构运动的影响

Fig. 11 Effect of different forward speeds on motion of profiling mechanism

于仿真地面向上的方向为 Y 轴正向,观察仿形机构 Y 轴方向质心变化趋势,探究不同前进速度对仿形机构运动趋势的影响。

Y 轴方向仿形机构质心位移曲线如图 11 所示。在不同的前进速度下,仿形机构可以在不施加外力的作用下与地面保持较好的贴附,虽然随着前进速度的加大,抖动情况也呈微小的正相关变化,误差均在 $\pm 3 \text{ mm}$ 内,整体趋势变化与仿真地面相符,这说明仿形机构可以依靠自重贴附于地面对地形高度信息进行采集,且所采集的数据是稳定的、有效的,可以为控制器提供较准确的检测数据,满足自重摆动式仿形机构的设计要求。

在此基础上优化仿形机构尾端结构,以避免执行倒车操作时产生的冲击力使触地部件发生弯折。根据式 (1) 计算可知,当仿形机构倒退时产生的最大碰撞力 $F_2 \leq 2\,260 \text{ N}$ 时,仿形机构的触地部件不会产生破坏。综上,进行仿真试验,设置前进速度为 2 km/h (550 mm/s),分别选择尾端半径 75、85、95、105 mm 总计 4 个水平,添加驱动函数以实现仿形机构的往复运动,设置总仿真时间 5 s,步数为 500 步,仿形机构受力曲线如图 12 所示。

由图 12 可知,当尾端半径 d_w 为 105 mm 时,地面对仿形机构造成的最大碰撞力为 1 976 N,随着仿形机构触地部件尾端半径的增大,倒车时对仿形机构造成的最大碰撞力变小,当尾端半径 $d_w = 105 \text{ mm}$ 时,最大碰撞力小于弯曲强度校核公式所计算的 2 260 N,符合仿形机构设计要求,最终确定尾端半径 $d_w = 105 \text{ mm}$ 。

3 随动控制系统软件设计

3.1 随动控制系统方法

割台随动控制系统需要根据仿形机构所检测到的地面起伏变化实时调整割台高度,系统控制策略的优劣直接影响整套系统的调控性能^[26]。因此,研究收获机割台高度与仿形机构采集信号的关系模型,用以设计割台高度控制 PID 算法,利用 Matlab

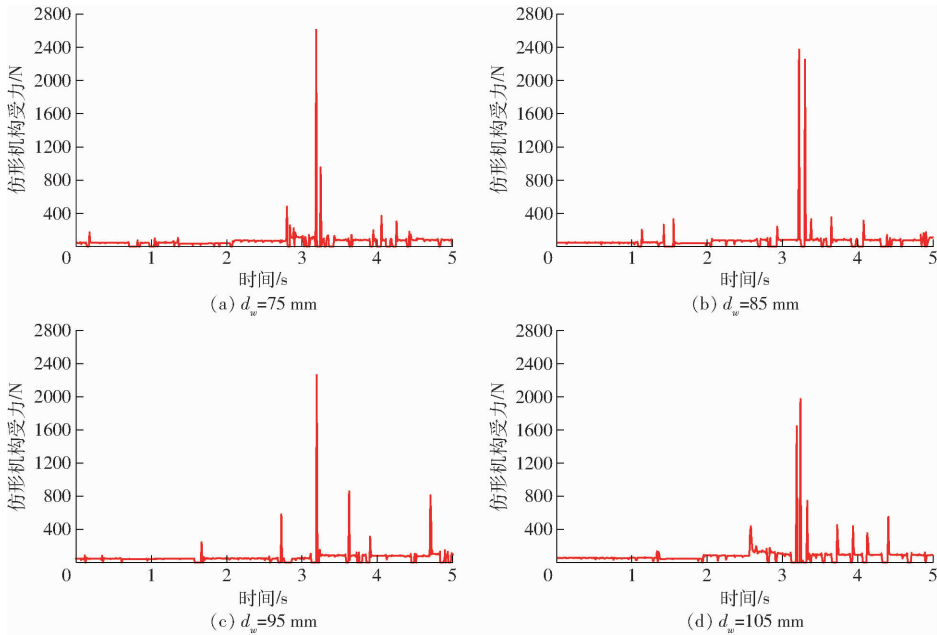


图 12 不同尾端半径对仿形机构受力的影响
Fig. 12 Effect of different tail end radii on force of profiling mechanism

软件中的 Simulink 模块建立 PID 控制仿真模型,对 PID 控制器比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d 等控制参数进行优化。

3.1.1 PID 控制器设计

根据仿形机构标定试验,角度传感器输出的模拟电压信号呈线性,由此得到仿形机构偏移角与输出电压的数学模型为

$$U = k_1 \alpha \tag{5}$$

式中 U ——角度传感器输出电压, V
 k_1 ——角度传感器输出电压与偏移角的标定系数
 α ——仿形机构偏移角, ($^\circ$)

割台高度与仿形机构偏移角之间的数学模型为

$$H_s = k_2 \cos \alpha + q \tag{6}$$

式中 H_s ——收获机割台高度, m
 k_2 ——收获机割台高度与偏移角度的标定系数
 q ——常数, m

结合式(5)、(6)可知,收获机割台实际高度为

$$H_s = k_2 \cos \frac{U}{k_1} + q \tag{7}$$

其中,割台随动控制系统通过自重摆动式仿形机构检测地形的起伏变化,再与预设高度和位移传感器的反馈值比较得到控制偏差 $e(t)$,采用 PID 控制方法得到割台高度控制的输出值,控制器发送信号至电磁阀驱动模组,驱动电磁阀工作,控制割台液压执行元件伸缩,并与位移传感器的反馈信号进行比较,检测割台是否到达预设高度,由此实现收获机割台高度的自动控制。PID 控制原理图如图 13 所示。

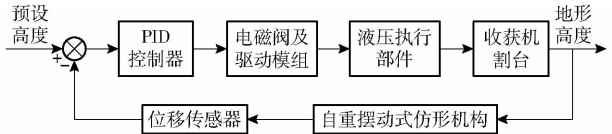


图 13 收获机割台自动控制 PID 控制原理图
Fig. 13 PID control schematic of harvester header automatic control

3.1.2 割台随动控制系统仿真

为了优化控制系统工作参数,验证控制策略的可靠性,实时观察系统的动态响应,根据上述所设计的割台随动控制系统,利用 Matlab 软件中的 Simulink 模块搭建仿真模型,如图 14 所示。

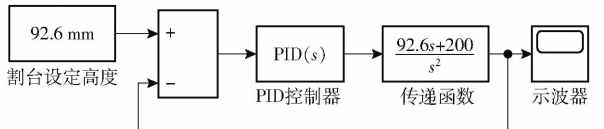


图 14 PID 控制仿真模型
Fig. 14 PID control simulation model

搭建仿真模型后,设置仿真时间为 3 s,采样时间为 0.015 s,对 PID 控制系统进行仿真。根据经验公式多次调整 PID 控制参数,再通过 tune 运算优化后得知,当比例系数 $K_p = 0.41$,积分系数 $K_i = 0.76$,微分系数 $K_d = 0.009$ 时, PID 控制器输出量稳态值为 92.6 mm,最大值为 98.7 mm,稳定时间为 0.95 s,超调量为 6.83%。超调量小,系统响应速度快,满足割台随动控制系统的设计要求,控制器阶跃响应曲线如图 15 所示。

3.2 控制系统程序设计

割台随动控制系统中,左、中、右 3 个仿形机构的角度传感器输出 0 ~ 5 V 模拟电压信号,用于反馈

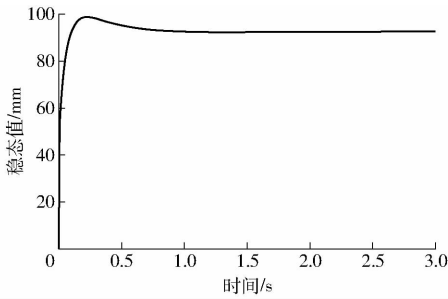


图 15 PID 控制器阶跃响应曲线

Fig. 15 Step response curve of PID controller

割台高度的位移传感器输出 4 ~ 20 mA 模拟电流信号,信号经过滤波、保护电路处理后分别接入 A/D 转换电路的接口 VIN0、VIN1、VIN2 和 IIN0,将模拟信号转换为数字信号,通过 SPI 串行通信接口传输到 STM32 控制器,随动控制系统的控制流程如图 16 所示。

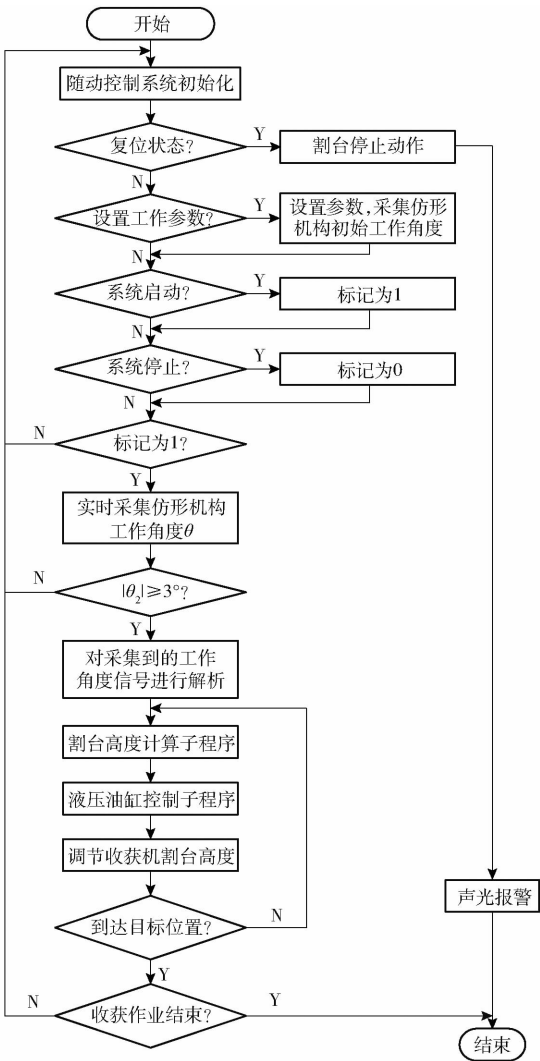


图 16 控制流程图

Fig. 16 Control flow chart

因在同一水平线布置了 3 个仿形机构,因此控制器需对仿形机构所采集到的信号进行处理,在工作过程中,若其中某一个仿形机构突然抬升幅度过

大且大于其他两仿形机构的角度和,可判定为受到复杂环境影响而产生的瞬时变化,控制系统将其采集的数据忽略,并计算其余两仿形机构角度的平均值作为输出信号,但抬起高度超出规定范围且时间超过 3 s 则向上抬起割台,避免割台与地面发生碰撞。以下两种情况下判定地面整体起伏产生变化:①若两个或两个以上仿形机构同时大幅度抬升或下降且超过一定时间。②3 个仿形机构同时抬升且所采集的地形高度数据差值小于 5 cm,控制器驱动电磁阀工作带动割台上浮或下降。

随动控制系统启动后,上位机显示系统状态,系统初始化。若检测到系统处于复位状态,首先停止液压执行元件动作,并发送声光报警指令,检修、重新通电后系统运行。若驾驶员对工作参数进行设定,则根据设定要求设置调整仿形机构初始工作角度 θ_0 。若收到停止指令,工作标志位置为 0,系统停止工作重新初始化;若收到启动指令后,工作标志位置为 1,仿形机构实时采集地面高度数据,根据式(2),若仿形机构变化角度 $\theta_2 \geq 3^\circ$,则记录数据并通过 A/D 转换电路将采集到的模拟信号转换为数字信号,输送至 STM32 控制器。控制系统根据上文的控制规则,对采集信号进行处理再通过控制器数据解析后,与设定值比较,再经 STM32 分析处理,若为地面上升信号则通过电磁阀驱动模组使液压执行机构工作,带动刀盘上浮,反之,则驱动刀盘下降,再将当前割台高度控制的输出值与位移传感器的反馈信号进行比较,误差小于等于 1 cm 时,完成割台高度调整动作,进而实现对割台高度的自动调整和控制。

4 田间试验

4.1 试验条件

为了检测甘蔗收获机割台随动控制系统性能、可靠性及控制精度,2021 年 12 月在广西壮族自治区武鸣区甘蔗试验基地进行田间实地收获试验,试验垄长度大于 120 m。收获作业机具为广西农业机械研究院有限公司研制的 4GZQ130 - A 型甘蔗收获机,割台宽度为 700 mm,功率为 130 kW,田间试验情况如图 17 所示。



图 17 田间试验

Fig. 17 Field experiment

4.2 试验方法

参照标准 JB/T 6275—2007《甘蔗收获机械》规定及其他相关农业机械试验方法设计收获试验流程。试验在两种不同状态下进行,分别为收获机启动割台随动控制系统和不启动割台随动控制系统。首先,驾驶员启动机具,启动割台随动控制系统进行收获作业,设定切割高度,收获 3 垄,随后,关闭割台随动控制系统进行收获作业,设定切割高度,收获 3 垄,二者交替进行,每收获一垄观察留茬高度,记录试验数据,设定收获速度为 1.5 km/h(0.42 m/s)。最后,测量地面至甘蔗被切点距离及计算破头率,用以考察割台随动控制系统和整机的性能。破头率是指完成收获作业后破头甘蔗宿根数量与该垄甘蔗有效株数百分比。

4.3 试验结果

试验结果如表 1~3 所示,偏差为实际高度与设定高度差值,结果取绝对值。

表 1 预设留茬高度 50 mm 时自动控制性能测试结果

Tab.1 Results of automatic control performance test when preset stubble height was 50 mm

试验 序号	设定高度/ mm	实际高度/mm		偏差绝对值/mm		破头率/%	
		人工 控制	自动 控制	人工 控制	自动 控制	人工 控制	自动 控制
1	50	72	55	22	5		
2	50	68	58	18	8		
3	50	66	46	16	4	37	16
4	50	63	57	13	7		
5	50	70	60	20	10		
6	50	72	56	22	6		
7	50	78	60	28	10		
8	50	62	59	12	9	41	20
9	50	65	55	15	5		
10	50	71	56	21	6		

试验结果表明:留茬高度为 50 mm 时,人工控制割台高度的偏差平均值为 18.7 mm,破头率平均值为 39%;自动控制割台高度偏差平均值为 7.0 mm,破头率平均值为 18%。留茬高度为 100 mm 时,人工控制割台高度的偏差平均值为 14.8 mm,破头率平均值为 38.5%;自动控制割台高度偏差平均值为 8.8 mm,破头率平均值为 18.5%。留茬高度为 150 mm 时,人工控制割台高度的偏差平均值为 16.4 mm,破头率平均值为 41%;自动控制割台高度偏差平均值为 8.3 mm,破头率平均值为 26.5%。启用随动控制系统后,3 组试验预设留茬高度所对应的割茬实际测量高度的平均值分别为 55.8、104.8、156.9 mm,破头率得到有效控制,平均破头率为 21%,通过与人工控制收获试验对比,平均破头率下

表 2 预设留茬高度 100 mm 时自动控制性能测试结果

Tab.2 Results of automatic control performance test when preset stubble height was 100 mm

试验 序号	设定高度/ mm	实际高度/mm		偏差绝对值/mm		破头率/%	
		人工 控制	自动 控制	人工 控制	自动 控制	人工 控制	自动 控制
1	100	118	110	18	10		
2	100	115	108	15	8		
3	100	88	90	12	10	35	15
4	100	109	98	9	2		
5	100	116	105	16	5		
6	100	90	92	10	8		
7	100	119	112	19	12		
8	100	112	106	12	6	42	22
9	100	117	116	17	16		
10	100	120	111	20	11		

表 3 预设留茬高度 150 mm 时自动控制性能测试结果

Tab.3 Results automatic control performance test when preset stubble height was 150 mm

试验 序号	设定高度/ mm	实际高度/mm		偏差绝对值/mm		破头率/%	
		人工 控制	自动 控制	人工 控制	自动 控制	人工 控制	自动 控制
1	150	130	153	20	3		
2	150	138	155	12	5		
3	150	135	161	15	11	43	25
4	150	168	158	18	8		
5	150	165	163	15	13		
6	150	163	160	13	10		
7	150	172	162	22	12		
8	150	165	157	15	7	39	28
9	150	168	142	18	8		
10	150	166	156	16	6		

降 18.5 个百分点。以上测量偏差均在合理范围内,满足田间实际使用需求。由于安装了割台随动控制系统,在实际收获作业中收获机可以根据地势的起伏变化自动调整割台刀盘与地面之间的相对位置,实现收获作业的精准控制,从而降低破头率及人工劳动强度。

5 结论

- (1)针对国内现有甘蔗收获机割台高度调整困难且无法自动控制等问题,以 4GZQ130-A 型甘蔗收获机为载体,设计了甘蔗收获机割台随动控制系统,取代原有人工操作,实现割台高度的自动调控。
- (2)为了实现割台可以实时跟随地面起伏变化而自动调节高度,设计了自重摆动式仿形机构,利用 ADAMS 仿真软件对仿形机构进行受力及运动过程分析,验证了仿形机构可以较好地贴附地面并对仿

形机构尾端结构进行优化设计,解决了收获机在倒车操作时可能对仿形机构造成冲击或损坏的问题,当仿形机构触地部件的尾端半径为105 mm,倒车操作时地面对仿形机构造成的碰撞力最小,为1 976 N。

(3)进行田间试验,结果表明4GZQ130-A型

甘蔗收获机安装割台随动控制系统后,割茬高度与预设留茬高度偏差在20 mm内;破头率得到有效控制,平均破头率为21%。通过与人工控制收获试验对比,平均破头率下降18.5个百分点,进一步提升了收获机性能,割台随动控制系统整体性能满足设计及使用需求。

参 考 文 献

- [1] 刘芳建. 甘蔗收获机前置式切段装置机理及试验研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2018.
LIU Fangjian. Mechanism and experimental study on the front-load chopper in sugarcane harvester[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences,2018. (in Chinese)
- [2] 莫建霖,刘庆庭. 我国甘蔗收获机械化技术探讨[J]. 农机化研究,2013,35(3):12-18.
MO Jianlin, LIU Qingting. Discussion on the mechanization technology of sugarcane harvesting in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013,35(3):12-18. (in Chinese)
- [3] 韦巧,杨宝玲,高振江. 我国甘蔗产业化现状浅析[J]. 农机化研究,2015,37(4):247-254.
WEI Qiao, YANG Baoling, GAO Zhenjiang. Analysis of current situation of sugar cane industry[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015,37(4):247-254. (in Chinese)
- [4] 李尚平,王梦萍,莫翰宁,等. 基于动态特性的甘蔗收获机刀架仿真和模态分析[J]. 农机化研究,2018,40(12):17-22,29.
LI Shangping, WANG Mengping, MO Hanning, et al. Simulation and modal analysis of sugarcane harvester tool post based on the dynamic characteristics[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018,40(12):17-22,29. (in Chinese)
- [5] 尹明玉,马剑. 发展甘蔗收获机械化的建议[J]. 中国农机化学报,2014,35(4):296-300.
YIN Mingyu, MA Jian. Suggestion on development of sugarcane harvest mechanization[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014,35(4):296-300. (in Chinese)
- [6] 李尚平,闫显晓,徐冰,等. 丘陵地区剪叉式甘蔗转运车调平控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(11):384-393.
LI Shangping, YAN Yuxiao, XU Bing, et al. Design and experiment on leveling control system of scissor type sugarcane transporter in hilly area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(11):384-393. (in Chinese)
- [7] 白秋薇,简真,吴永峰,等. 基于切割压力的甘蔗收割机刀盘高度自动调节装置[J]. 农业工程学报,2021,37(3):19-26.
BAI Qiuwei, JIAN Zhen, WU Yongfeng, et al. Automatic height-adjustment for a cutter disk on a sugarcane harvester using cutting pressure[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(3):19-26. (in Chinese)
- [8] 肖威,陆静平. 甘蔗机械化收获技术现状分析[J]. 中国农机化学报,2022,43(2):50-59,142.
XIAO Wei, LU Jingping. Analysis of sugarcane mechanized harvesting technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022,43(2):50-59,142. (in Chinese)
- [9] 向家伟,杨连发,李尚平. 小型甘蔗收获机根部切割器结构设计[J]. 农业机械学报,2008,39(4):56-59.
XIANG Jiawei, YANG Lianfa, LI Shangping. Structural design of the base cutter for mini-type sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(4):56-59. (in Chinese)
- [10] 夏鼎宽,何冯光,邓干然,等. 甘蔗收获机切割器仿形机构研究现状与发展趋势[J]. 现代农业装备,2021,42(1):15-20.
XIA Dingkuan, HE Fengguang, DENG Ganran, et al. Research and application of orchard growing grass technology and equipment[J]. Modern Agricultural Equipment, 2021,42(1):15-20. (in Chinese)
- [11] 庄肖波,李耀明. 基于鲁棒反馈线性化的联合收获机割台高度控制策略[J]. 农业机械学报,2020,51(11):123-130.
ZHUANG Xiaobo, LI Yaoming. Header height control strategy of harvester based on robust feedback linearization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(11):123-130. (in Chinese)
- [12] 金诚谦,刘岗微,倪有亮,等. 基于MBD-DEM耦合的联合收获机割台仿形机构设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(2):1-10.
JIN Chengqian, LIU Gangwei, NI Youliang, et al. Design and experiment of header profiling mechanism for combine harvester based on MBD-DEM coupling[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(2):1-10. (in Chinese)
- [13] 简真,李光林,赵世卿,等. 甘蔗收割机刀盘高度自动调节系统模拟试验研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2018,40(10):12-18.
JIAN Zhen, LI Guanglin, ZHAO Shiqing, et al. Research and simulation test of an automatic adjusting system of blade height of sugarcane harvester[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2018,40(10):12-18. (in Chinese)
- [14] 廖勇,向阳,吴明亮,等. 联合收割机割台高度自适应调节系统的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(3):326-329.
LIAO Yong, XIANG Yang, WU Mingliang, et al. Design and test of the adaptive height adjustment system for header of the combine-harvester[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018,44(3):326-329. (in Chinese)
- [15] 周闯. 甘蔗收割机刀盘浮动控制系统研究[D]. 西安:长安大学,2020.
ZHOU Chuang. Research on floating control system of sugarcane harvester cutter disc[D]. Xi'an: Chang'an University,2020. (in Chinese)

- [18] WANG W, ZUO L, XU X. A learning-based multi-RRT approach for robot path planning in narrow passages[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2018,90:81 – 100.
- [19] SADHU A K, KONAR A, BHATTACHARJEE T, et al. Synergism of firefly algorithm and Q-Learning for robot arm path planning[J]. Swarm & Evolutionary Computation, 2018,43:50 – 68.
- [20] CHAUMETTE F, HUTCHINSON S. Visual servo control. I. Basic approaches[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13: 82 – 90.
- [21] 金玉成, 高杨, 刘继展, 等. 采摘机器人深度视觉伺服手-眼协调规划研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 18 – 25,42. JIN Yucheng, GAO Yang, LIU Jizhan, et al. Hand – eye coordination planning with deep visual servo for harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(6):18 – 25,42. (in Chinese)
- [22] MEHTA S, BURKS T. Vision-based control of robotic manipulator for citrus harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 102: 146 – 158.
- [23] 张建冬, 王东, 马立东, 等. 基于改进 RRT 算法的移动机械臂路径规划[J]. 电子测量技术, 2021, 44(23): 48 – 53. ZHANG Jiandong, WANG Dong, MA Lidong, et al. Obstacle avoidance planning of mobile manipulator based on improved RRT algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2021,44(23):48 – 53. (in Chinese)
- [24] WU L, REN H. Finding the kinematic base frame of a robot by hand – eye calibration using 3D position data[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017,14: 314 – 324.
- [25] LI Jiaqi, CHEN H B, ZHONG H, et al. Accuracy of end positioning for industrial six axis manipulator based on D – H matrix calculation[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018,9:75 – 77,99.

(上接第 128 页)

- [16] 刘小艳, 师帅兵, 李彩峰, 等. 图像处理在割台高度控制系统中的应用[J]. 农机化研究, 2009,31(4):178 – 180. LIU Xiaoyan, SHI Shuaibing, LI Caifeng, et al. Application of image processing on the platform altitudinal control system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009,31(4):178 – 180. (in Chinese)
- [17] AYMEN R, SAMI H, FAOUZI B. Global optimization in robust fractional control of uncertain fractional order systems: a thermal application using the STM32 microcontroller[J]. Electronics, 2022,11(2):268.
- [18] 于畅畅, 李洪文, 何进, 等. 基于 PID 算法的高频间歇供肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(11):45 – 53,63. YU Changchang, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment of high-frequency intermittent fertilizer supply system based on PID algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11):45 – 53,63. (in Chinese)
- [19] 程修沛, 李洪文, 王庆杰, 等. 小麦小区播种机排种控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019,50(7):30 – 38. CHENG Xiupei, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of wheat seeding control system in plot seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(7):30 – 38. (in Chinese)
- [20] 王申莹, 胡志超, 彭宝良, 等. 基于 ADAMS 的甜菜收获机自动对行探测机构仿真[J]. 农业机械学报, 2013,44(12):62 – 67. WANG Shenying, HU Zhichao, PENG Baoliang, et al. Simulation of auto-follow row detection mechanism in beet harvester based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(12):62 – 67. (in Chinese)
- [21] 邢洁洁, 徐丽明, 袁全春, 等. 马齿型玉米种子定向播种推送装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018,34(17):9 – 15. XING Jiejie, XU Liming, YUAN Quanchun, et al. Design and test of pushing device for dent corn seeds directional sowing[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(17):9 – 15. (in Chinese)
- [22] 徐丽明, 陈俊威, 吴刚, 等. 梳刷振动式枸杞收获装置设计与运行参数优化[J]. 农业工程学报, 2018,34(9):75 – 82. XU Liming, CHEN Junwei, WU Gang, et al. Design and operating parameter optimization of comb brush vibratory harvesting device for wolfberry[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(9):75 – 82. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] 邬备, 王德成, 王光辉, 等. 小型自走式割草机仿形装置仿真分析与试验[J]. 农业机械学报, 2015,46(7):123 – 129,108. WU Bei, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Simulation analysis and experiment of profiling device of small self-propelled mower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7):123 – 129,108. (in Chinese)
- [25] GETACHEW A A, HIRPA G L. Dynamic analysis of spur gear with backlash using ADAMS[J]. Materials Today: Proceedings, 2021,38(5):2959 – 2967.
- [26] 程念, 胡焉为, 苗玉彬. 收割机割台高度的模糊控制策略研究[J]. 机电一体化, 2018,24(4):17 – 22. CHENG Nian, HU Yanwei, MIAO Yubin. Research on fuzzy control of harvester header height[J]. Mechatronics, 2018, 24(4):17 – 22. (in Chinese)