

玉米收获机割台高度自动调控系统设计与试验

耿爱军^{1,2} 张 猛¹ 张 姬^{1,3} 张智龙^{1,2} 高 昂¹ 郑金龙¹

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;
3. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018)

摘要: 针对目前国内玉米收获机割台操控仍依靠机械调控、调整不便等问题,设计了一种割台高度自动调控系统。该系统包括浮动压紧式仿形机构、STM32 控制单元、显示模块、按键模块、电磁阀驱动模块等。浮动压紧式仿形机构由角度传感器、仿形板、扭簧、固定轴等组成,利用 ADAMS 软件得到了仿形板垂直高度变化情况并设计了扭簧,能够较好贴附地面行走。建立了割台高度自动调控参数模型,采用 PID 控制算法实现割台高度的自动调控。控制系统通过仿形机构检测割台的离地高度,经 STM32 控制单元处理后,通过割台油缸自动调整割台的离地高度。测试结果表明,割台在按键模式下调控时平均响应速度为 0.42 m/s,在自动调控模式下割台实际高度与设定高度的误差在 20 mm 以内,均满足玉米收获机割台调控的需要。研究结果可为玉米收获机智能化设计提供参考。

关键词: 玉米收获机; 割台高度; 自动调控; 设计; 试验

中图分类号: S225.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0118-08

Design and Experiment of Automatic Control System for Corn Header Height

GENG Aijun^{1,2} ZHANG Meng¹ ZHANG Ji^{1,3} ZHANG Zhilong^{1,2} GAO Ang¹ ZHENG Jinlong¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Tai'an 271018, China
3. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Tai'an 271018, China)

Abstract: Aiming at the problems that current domestic corn headers continued to be mechanically adjusted and the adjustment was inconvenient, an automatic control system for corn header height was designed. The automatic control system included a floating compression profiling mechanism, STM32 control unit, display screen, key switch, solenoid valve drive module, etc. Floating compression profiling mechanism was composed of angle sensor, profiling plate, torsion spring, fixed shaft, etc. The profiling plate and angle sensor were designed and selected, and the analysis on working process and force of the profiling plate were carried out. ADAMS software was utilized to obtain the vertical height change of the profiling plate under different torque conditions of the torsion spring, and the torsion spring was designed according to the simulation results to achieve better adhesion to the ground. The automatic adjustment parameter model of the header height was established, and PID control algorithm was used to realize the automatic adjustment of the header height. The simulation model was built in Matlab/Simulink software and the system simulation was performed. After tune calculation optimization, when K_p was 1.2, K_i was 0.68 and K_d was 0.9, PID controller could meet the design requirements of the automatic control system of the header height. In automatic profiling mode, the control system detected the height of the header from the ground through the profiling mechanism, and the header cylinder automatically adjusted the height of the header from the ground after processing by the STM32 control unit. In manual mode, STM32 control unit recognized the key signal and controlled the lifting of the header according to different key signals. After completing the design of the automatic control system for the header height, the control system was installed on the 4YZP4HQ corn harvester, and functional tests were carried out. In the

收稿日期: 2020-08-05 修回日期: 2020-09-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0300606)、山东省重大科技创新工程项目(2018CXGC0217)和山东省自然科学基金博士基金项目(ZR2017BEE032)

作者简介: 耿爱军(1973—),女,副教授,主要从事农业机械设计研究,E-mail: gengaj@sdau.edu.cn

通信作者: 张智龙(1988—),男,讲师,博士,主要从事现代农业装备与计算机测控研究,E-mail: sdauzzl@163.com

manual mode, the adjustment time was taken as the system response index, and a stopwatch was used to record the time required for the header to move from the start to the specified position, and the results showed that the average response speed during adjustment was 0.42 m/s. In automatic profiling mode, the control system automatically adjusted the header height from the ground, the height of the header was measured randomly when the harvester stopped every 20 ~ 30 m, and the result showed that the error between the actual height of the header and the set height was within 20 mm. The average speed of the header in manual mode and the actual height in automatic control mode met the needs of the corn harvester header control. The research result could provide reference for the intelligent research of corn harvester.

Key words: corn harvester; header height; automatic control; design; experiment

0 引言

玉米收获机工作性能、驾驶员操作水平以及作物生长状态对玉米收获作业效率和收获品质有着直接的影响。随着机械化水平的提高,玉米收获机正向大型化、现代化、自动化和精准化方向发展^[1]。发达国家已经将导航、遥感、电子和地理信息系统等先进技术应用于玉米收获机上,收获机的智能化程度得到显著提升^[2-8]。而我国玉米收获机智能化水平较低,收获机调控多停留在操纵杆操控阶段,关键部件仍有待突破。提高收获机智能化、自动化水平,降低故障率,减少谷物损失^[9-11],对保障我国粮食安全具有重要意义。

割台高度是收获机作业过程的重要参数,割台高度过高,可能造成作物损失量增大;割台高度过低,可能造成割台堵塞或者触地,给收获机造成一定损害^[12-13]。为了保证割台高度一致性,国内学者在收获机割台高度自动控制方面做了相关研究。文献[14]提出了一种基于超声波传感器的割台高度控制系统,但在实施过程中易受到杂草、土块的干扰。文献[15]基于图像处理技术提出了一种倒伏小麦的检测方法,用摄像头收集前方未收割作物的图像,据此来控制割台的高度,但是摄像头价格昂贵且易受到田间灰尘的影响。文献[16]设计了一种割台高度自适应调节系统,通过位移传感器调整液压缸伸缩量来检测割台高度,但是缺少整机数据采集,精确度有待提高。文献[17]设计了一种机械式仿形机构,能够较好地检测地面高度并且进行调整,但未在起伏较大田块试验,仍有待完善。

针对国内现有收获机割台高度调整不便、自动化程度低等问题,本文设计一种割台高度自动调控系统,通过浮动压紧式仿形机构贴附地面行走,建立收获机割台高度与传感器信号的关系模型,设计割台高度调控 PID 控制算法,完成割台手动/自动调控系统设计,以期实现收获机割台的自动调控,为实现收获机割台操控的自动化提供参考。

1 自动调控系统整体方案设计

为了减少由于割台高度不能按需调整造成的收获损失,降低驾驶员操作难度,设计了割台高度自动调控系统。调控系统设计有手动按键调控和自动调控 2 种工作模式。手动按键调控是通过按键完成割台升降,无需操纵机械手柄;自动调控是在玉米收获过程中,收获机根据地面起伏情况,自动完成割台高度调整。驾驶员可根据实际需要切换 2 种工作模式。

1.1 自动调控系统整体结构

自动调控系统主要由 STM32 控制单元、浮动压紧式仿形机构、按键模块、显示模块和电磁阀及其驱动模块组成。玉米收获机割台自动调控系统的总体结构组成如图 1 所示。

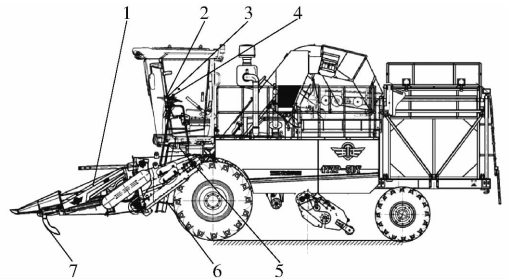


图 1 玉米收获机割台自动调控系统的总体结构示意图

Fig. 1 Schematic of general mechanism of automatic control system of corn header

- 1. 收获机割台 2. STM32 控制单元 3. 显示模块 4. 按键模块
- 5. 电磁阀及其驱动模块 6. 液压油缸 7. 浮动压紧式仿形机构

浮动压紧式仿形机构安装在割台底部以贴合地面,通过机械结构接触地面,随地面起伏变换而动作,将地面的浮动变化情况转变为电信号输出。主控制单元采用 STM32f4 系列单片机,具有较强的数据处理功能,能够满足信号采集接口和数据处理的需要^[18-20]。显示模块采用 4.3 寸 T-LCD 液晶显示屏,以 LED 作为状态指示灯,实时检测控制系统的运行状态。按键模块包括复位按键、手动/自动调节切换按键和手动调节按键。自动调控系统组成如图 2 所示。割台执行部件采用液压控制,液压元件

选用电磁换向阀和电磁溢流阀。

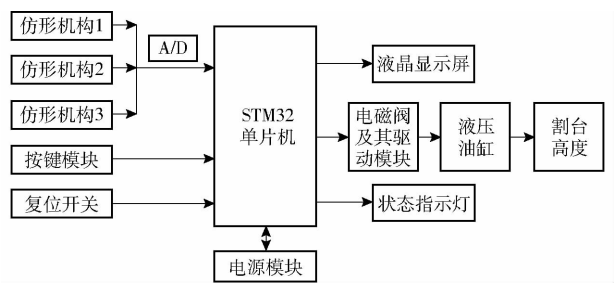


图2 自动调控系统组成

Fig.2 Overall structure of automatic control system

1.2 工作原理

割台自动调控系统通过仿形机构检测割台的离地高度,控制系统通过电磁阀控制割台油缸完成割台高度的自动调控。由于割台较宽,考虑到单个仿形机构无法精确检测割台各分离地情况,设计了位于同一直线的3个仿形机构来检测割台离地高度。若1个仿形机构检测到地面高度升高,则向上抬起割台,以防止割台前端触地,避免结构损坏;若1个或2个仿形机构检测到割台离地高度变大,此时若降低割台高度,可能造成割台前端触地,因此当3个仿形机构同时检测到割台离地高度变大时,控制系统控制降低割台高度。

割台仿形控制原理图如图3所示,STM32通过电磁阀驱动模块控制电磁换向阀和电磁溢流阀的打开和关闭。当换向阀左侧通电,左侧液压缸压力增大,油缸活塞向右侧移动,液压油缸伸长,割台升高;当换向阀右侧通电,右侧液压缸压力增大,油缸活塞向左侧移动,液压油缸缩短,割台下降低。

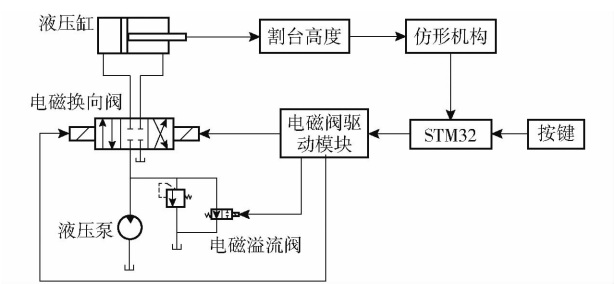


图3 割台仿形控制原理图

Fig.3 Principle diagram of profiling hydraulic control for header

2 自动调控系统硬件设计

2.1 浮动压紧式仿形机构设计

浮动压紧式仿形机构主要包括角度传感器、扭簧、仿形板、联轴器和固定件等,如图4所示。

浮动压紧式仿形机构仿形板在扭簧的作用下紧贴地面,随地面的起伏动作,从而带动固定轴转动;角度传感器通过线绕式联轴器与固定轴相连,

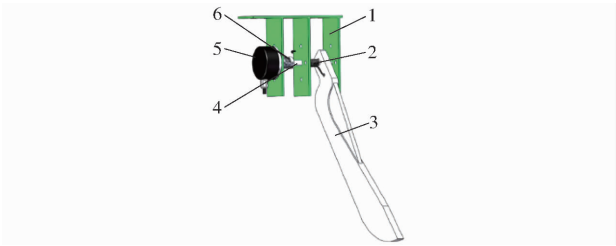


图4 浮动压紧式仿形机构

Fig.4 Floating compression profiling mechanism

1.固定件 2.扭簧 3.仿形板 4.固定轴 5.角度传感器 6.线绕式联轴器

通过检测固定轴的旋转角度,计算割台的离地高度。

为保证收获机作业时割台离地高度为220 mm,仿形板的尺寸设计为380 mm×90 mm×20 mm。为了减缓冲击,防止仿形板损坏,仿形板材料选用PVC塑料。考虑到收获机倒车时可能对仿形板结构造成冲击损害,仿形板采用圆弧形。为保证仿形板仿形的准确性,在仿形板安装轴处增设扭簧,确保仿形板始终贴地工作。仿形板与固定轴通过销键连接固定,仿形板随地面起伏运动时,带动固定轴做旋转运动。为避免仿形部件在工作时的冲击对角度传感器造成损坏,使用线绕式联轴器将安装轴和角度传感器固定。

角度传感器采用Heneywell公司的RTY120LVNAX型传感器,能够将-60°~60°之间的角度信号转换成0.5~4.5 V的电压信号,满足仿形板偏转角度测量的需要。

2.2 基于ADAMS仿真的浮动压紧式仿形机构优化

仿形机构正常工作是准确检测割台离地高度的保障,为了使仿形板能够一直紧贴地面,对仿形板的工作过程和受力情况进行分析,受力分析图如图5所示。

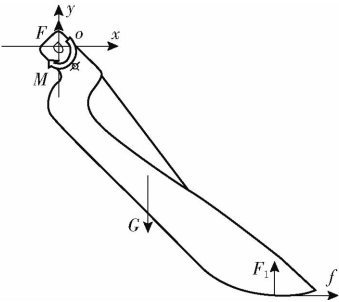


图5 仿形板受力分析图

Fig.5 Stress analysis diagram of profiling plate

设仿形板的长度为L,正常工作时与水平方向的夹角为45°,以o点为矩心,可得平衡方程

$$F + F'_1 = G'$$
 (1)

$$M + G \frac{L}{2} \cos 45^\circ = F_1 L \cos 45^\circ + f L \cos 45^\circ$$
 (2)

- 式中 F ——固定轴对仿形板的支持力, N
 G ——仿形板自身重力, N
 G' ——仿形板自身重力在 o 点的等效力, N
 F_1 ——地面的支持碰撞力, N
 F'_1 ——地面支持碰撞力在 o 点的等效力, N
 f ——摩擦力, N
 M ——扭簧施加的扭矩, N·m

仿形板在工作过程中, 由于田间存在土块、杂草等, F_1 不是一个恒定的力, 若 M 太小, 则仿形板会产生跳动, 影响传感器信号的稳定; 若 M 太大, 会对仿形板造成摩擦损耗, 影响仿形板的使用寿命, 并且在潮湿的地面工作时, 会造成仿形板的下陷, 影响仿形精度。为确定合适的扭矩, 采用 ADAMS 软件对仿形板的工作情况进行了仿真分析。

为提高试验效率, 在建立仿真模型时对仿形机构进行简化^[21-23]。简化后的模型主要包括仿形板、安装轴、固定件和地面等, 利用 SolidWorks 建立三维装配模型(. X_T)并导入 ADAMS/View。

地面材质为土壤, 密度 $7.801 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, 泊松比 0.29, 弹性模量 $2.07 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ^[24]。仿形板材质为塑胶类, 其他零部件材料设置为普通碳钢。根据各部件实际的运动形式, 在各部件之间添加固定副、滑移副和旋转副等约束, 在仿形板和地面之间添加接触约束^[25-26], 如图 6 所示。在安装轴与固定件所设置的旋转副上增加扭矩, 代替弹簧对仿形板所施加的力。

建立仿真模型后, 设置仿真总时间为 5 s, 步数为 500 步, 以仿形机构的行进方向为 X 轴正向, 以 X 轴垂直向上的方向为 Y 轴正向。仿真试验以扭簧施加的扭矩为影响因素, 扭簧扭矩选择 0 (不施加扭矩)、5、10、15 N·mm 共 4 个水平, 考察扭簧扭矩对仿形板贴附地面行走性能的影响。

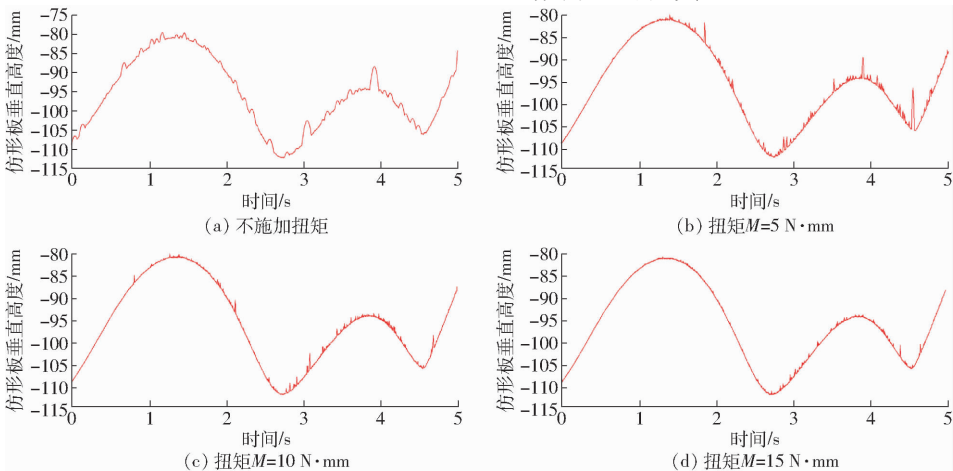


图 7 不同扭矩对仿形板运动情况的影响

Fig. 7 Influence of different torques on motion of profiling plate

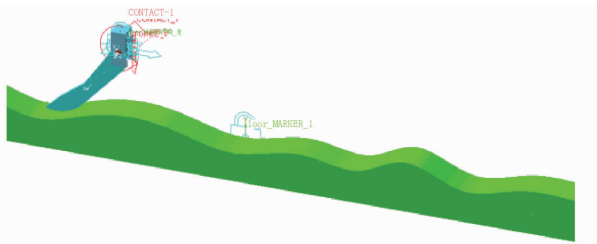


图 6 仿形机构仿真模型

Fig. 6 Simulation model of profiling mechanism

仿形板质心 Y 轴方向的位移曲线如图 7 所示。在不施加扭矩的情况下 (图 7a), 仿形板与地面间的冲击作用没有扭簧限制, 仿形板贴附地面行走时存在明显的抖动。如图 7b、7c、7d 所示, 随着施加的扭矩逐渐增大, 扭簧对仿形板与地面间冲击的限制作用逐渐增强, 抖动情况呈负相关变化; 当扭矩增加到 15 N·mm 时, 抖动效果去除比较明显, 考虑到扭矩在 15 N·mm 时满足设计要求, 且继续增加扭矩会造成仿形机构下陷、阻力变大等问题, 因此选择 15 N·mm 作为扭簧的选型设计标准。

以扭簧为研究对象, 根据仿真结果, 对扭簧进行设计选型, 其主要参数的计算公式为

$$M = PR = \frac{Ed^4 \alpha}{3660nD} \quad (3)$$

- 式中 P ——负载, N
 R ——力臂长度, mm
 E ——材料弹性模量, MPa
 d ——线径, mm
 α ——扭动角度, ($^\circ$)
 n ——弹簧有效圈数
 D ——中径, mm

根据仿真试验结果及仿形机构尺寸需求, 选择力臂长度为 60 mm, 中径为 14 mm, 初始扭动角度为 180° 对扭簧进行设计选型, 最终确定线径为 2 mm、圈数为 6 的扭簧。

3 自动控制系统软件设计

3.1 自动控制系统算法

割台高度自动调控系统需要根据地面起伏实时调整割台的离地高度,割台高度自动调控系统控制策略的优劣将直接影响割台调控性能。为此,对收获机割台高度与传感器信号的关系模型进行研究,设计割台高度调控 PID 控制算法,并通过 Matlab/Simulink 模块搭建仿真模型,优化相关控制参数。

3.1.1 自动调控系统 PID 控制器设计

由于角度传感器输出呈线性,易得到仿形板的偏转角与输出电压的关系为

$$U = k_1 \beta \tag{4}$$

式中 U ——角度传感器输出电压,V
 β ——仿形板旋转角度,(°)
 k_1 ——电压与角度的标定系数

根据试验标定,割台高度与仿形板旋转角之间关系模型为

$$H = k_2 \cos \beta + c \tag{5}$$

式中 H ——割台高度,m
 k_2 ——割台高度与角度的标定系数
 c ——常数,m

由式(4)、(5)推算割台实际高度为

$$H = k_2 \cos \frac{U}{k_1} + c \tag{6}$$

其中,割台高度自动调控系统通过浮动压紧式仿形机构检测割台的离地高度,经过与给定高度比较,得到控制偏差 $e(t)$,采用 PID 控制算法推算出系统输出量,控制系统通过电磁阀驱动模块,驱动电磁换向阀动作,控制割台液压缸伸缩,从而实现割台高度的自动调控,控制原理如图 8 所示。

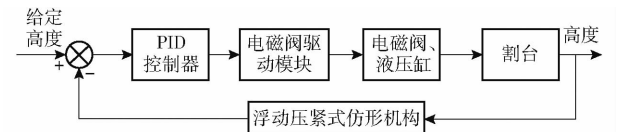


图 8 割台高度自动调控 PID 控制原理图
Fig. 8 PID control schematic of header height automatic control

3.1.2 割台高度自动调控系统仿真

为了验证控制策略的可行性,优化割台高度自动调控系统工作参数,实时观察系统的动态响应。根据上述割台高度自动调控系统设计,在 Matlab/Simulink 软件中搭建仿真模型,如图 9 所示。

设置仿真时间为 2 s,采样时间为 0.01 s,对控制系统进行仿真。经 tune 运算优化,当比例系数 $K_p = 1.2$,积分系数 $K_i = 0.68$,微分系数 $K_d = 0.9$ 时, PID 控制器输出量的最大值为 286.6 mm,稳态值为

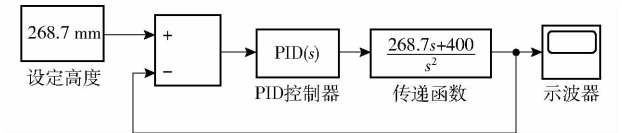


图 9 割台高度自动调控 PID 控制仿真模型
Fig. 9 PID control simulation model of header height automatic control

268.7 mm,超调量为 6.67%,稳定时间为 0.9 s,响应速度快,超调量小,能满足割台高度自动调控系统的设计要求,阶跃响应曲线如图 10 所示。

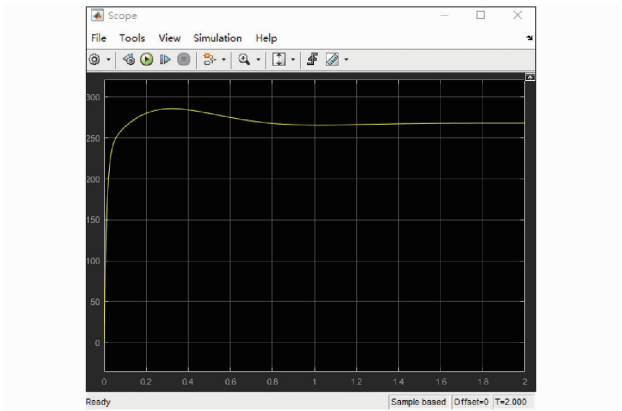


图 10 PID 控制器响应曲线
Fig. 10 Corresponding curve of PID controller

3.2 割台高度自动调控系统程序设计

割台高度自动调控系统输入信号包括 3 个模拟量信号(3 个仿形机构),分别接入 PF6、PF7 和 PF8 3 个 A/D 检测通道,输出信号包括 2 个电磁换向阀和 1 个电磁溢流阀。调控系统的主要流程图如图 11 所示。

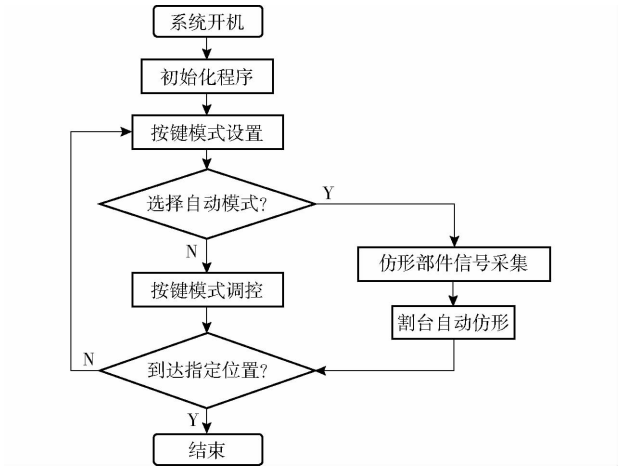


图 11 调控系统的主要流程图
Fig. 11 Main flow chart of control system

系统开机后,LED 状态指示灯闪动,系统正常,仿形部件进行割台信号采集。操作人员通过按键设置系统模式,系统进入模式辨别检测。自动仿形模式下,浮动压紧式仿形机构实时采集割台信号,通过 ADC 模块将模拟信号转换成数字信号,然后转换成

割台相应的高度,转换后的数据与给定值进行比较,经 STM32 分析处理,通过电磁阀驱动模块运算放大后控制电磁阀的通断,进而实现割台高度的自动调控。手动模式下,STM32 对按键信号进行识别,根据不同的按键信号,控制割台升降。

4 功能测试与结果分析

4.1 试验条件及设备

2019 年 5 月 20 日,在山东省日照市五莲县五征工业园颠簸试验场地进行试验,试验场面积约为 0.6 hm²,土质较硬、土壤表层干燥,在起伏路面开展割台自动调控试验,起伏高度差为 8.5 cm,起伏坡度为 23°。试验机型为 4YZP4HQ 型茎穗兼收玉米收获机,如图 12 所示。



图 12 4YZP4HQ 型茎穗兼收玉米收获机

Fig. 12 4YZP4HQ corn harvester

试验设备包括:浮动压紧式仿形机构、STM32 控制器(正点原子,STM32F4ZGT6)、卷尺、秒表、继电器模块、电磁换向阀等。

4.2 试验结果

4.2.1 割台高度手动调整功能测试

在收获机上安装参数调节装置,进行按键参数调节测试。以调节时间作为系统响应指标,使用秒表记录割台从开始动作到指定位置所需时间,进行割台升降调控。调节装置手动功能测试结果如表 1 所示。

表 1 割台升降手动功能测试结果

Tab.1 Manual function test of lifting header

试验号	割台上升高度/m	响应时间/s	速度/(m·s ⁻¹)
1	0.4	1.2	0.33
2	0.4	0.7	0.57
3	0.4	1.2	0.33
4	0.4	0.8	0.50
5	0.4	0.9	0.44
6	0.4	0.7	0.57
7	0.4	1.0	0.40
8	0.4	1.1	0.36
9	0.4	1.0	0.40
10	0.4	1.3	0.30
11	0.4	1.0	0.40
12	0.4	1.0	0.40

根据 GB/T 21962—2008 的规定,自走式收获机割台工作状态下的提升速度应高于 0.2 m/s。根据试验数据可得,试验割台上升平均速度为 0.42 m/s,割台按键升降系统的响应速度高于国家标准要求。

4.2.2 割台高度自动调整功能测试

在玉米收获机上安装浮动压紧式仿形机构、继电器模块等,校准角度传感器信号,对割台高度自动调控系统进行系统调试。

驾驶员启动玉米收获机割台高度自动调控系统模拟作业收获,试验期间驾驶员只控制收获机速度和方向,由控制系统自动调控制割台的离地高度,每 20~30 m 随机停机测量割台的离地高度,试验人员观察控制系统的割台调控情况,记录试验数据,如图 13 所示。



图 13 割台高度测量

Fig. 13 Height measurement of header

将测量结果与割台的设定高度 220 mm 进行比较,以此对割台高度自动调控系统进行评价,相关试验数据如表 2 所示。

表 2 割台高度自动控制测试结果

Tab.2 Automatic height control test of header

试验号	割台设定高度/mm	割台测量高度/mm	偏差/mm
1	220	223	3
2	220	220	0
3	220	231	11
4	220	216	4
5	220	210	10
6	220	215	5
7	220	209	11
8	220	232	12
9	220	240	20
10	220	220	0
11	220	233	13
12	220	230	10

试验结果表明,割台设定高度 220 mm 与割台实际测量高度的平均值 223.25 mm 误差微小,每

次测量偏差均在 20 mm 以内,满足田间工作需要。

5 结论

(1)针对国产玉米收获机多以机械式操纵杆控制割台高度的现状,设计了割台高度自动调控系统,建立了割台参数模型,代替原有的机械式操纵杆操作,实现割台手动/自动调控,为收获机割台的自动化研究提供参考。

(2)为了实现割台可靠贴附地面行走,设计

了浮动压紧式仿形机构,分析其受力和运动过程,并通过 ADAMS 软件进行部件的设计与优化,确定了扭簧的关键参数为扭矩 15 N·mm,线径 2 mm,圈数 6。

(3)在完成割台高度自动调控设计后,进行了割台手动/自动调控测试。结果表明,手动按键功能下,割台调控平均速度为 0.42 m/s,自动调控功能下,实际高度与设定高度误差不超过 20 mm,效果较好,满足割台高度调控需求。

参 考 文 献

- [1] 陈志,郝付平,王锋德,等. 中国玉米收获技术与装备发展研究[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(12):44-50. CHEN Zhi, HAO Fuping, WANG Fengde, et al. Development of technology and equipment of corn harvester in China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):44-50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.009. (in Chinese)
- [2] BENSON E R, REID J F, ZHANG Q. Machine vision-based guidance system for agricultural grain harvesters using cut-edge detection[J]. Biosystems Engineering, 2003,86(4):389-398.
- [3] SPECKMANN H, JAHNS G. Development and application of an agricultural BUS for data transfer[J]. Computers and Electronics in Agriculture,1999,23(3):219-237.
- [4] CARLIN J F. Electro-hydraulic control of combine header height and reel speed[J]. SAE, 1984(6):37-41.
- [5] WONJAE C, HIROKI K, MICHIIHISA I, et al. Autonomous positioning of the unloading auger of a combine harvester by a laser sensor and GNSS[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food,2015,8(3):178-186.
- [6] MAHMOUD O, MAJID L, HOSSEIN M, et al. Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester[J]. Expert Systems with Applications,2010,37(10):7080-7085.
- [7] 崔涛,樊晨龙,张东兴,等. 玉米机械化收获技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(12):1-13. CUI Tao, FAN Chenlong, ZHANG Dongxing, et al. Research progress of maize mechanized harvesting technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12):1-13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191201&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.001. (in Chinese)
- [8] 张真,迟瑞娟,杜岳峰,等. 基于 CAN 总线的玉米收获智能控制系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):275-281. ZHANG Zhen, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Investigation on CAN-bus-based corn harvester intelligent control system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):275-281. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s036&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.036. (in Chinese)
- [9] 陈进,蔡阳阳,陈璇. 基于 FSM 的联合收割机多按键控制系统设计[J]. 电子科技,2017,30(1):154-156,160. CHEN Jin, CAI Yangyang, CHEN Xuan. Design of multi-key embedded control system of combine harvester based on FSM[J]. Electronic Science and Technology, 2017, 30(1):154-156,160. (in Chinese)
- [10] 梁学修. 联合收割机自动监测系统研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2013. LIANG Xuexiu. Study on automatic monitoring system for combine harvester[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2013. (in Chinese)
- [11] 李耀明,梁振伟,赵湛,等. 联合收获机谷物损失实时监测系统研究[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):99-102. LI Yaoming, LIANG Zhenwei, ZHAO Zhan, et al. Real-time monitoring system of grain loss in combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(Supp.):99-102. (in Chinese)
- [12] 张认成,桑正中,张际先. 联合收割机自动控制研究现状与展望[J]. 江苏理工大学学报,1998,19(2):13-18. ZHANG Rencheng, SANG Zhengzhong, ZHANG Jixian. State-of-art and prospect on combine automatic control[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology,1998,19(2):13-18. (in Chinese)
- [13] 易立单. 联合收割机堵塞故障监测系统研究[D]. 镇江:江苏大学,2010. YI Lidan. Research on jam fault monitoring system for combine harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2010. (in Chinese)
- [14] 杨术明,杨青,杨银辉. 基于超声波传感器的割台高度控制系统设计[J]. 农机化研究,2008,30(3):134-136. YANG Shuming, YANG Qing, YANG Yinhui. An ultrasonic-based combine header height control system[J]. Journal of

- Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(3): 134 – 136. (in Chinese)
- [15] 刘小艳, 师帅兵, 李彩峰. 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 Suhaibing, LI Caifeng, Application of image processing on the platform altitudinal control system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4): 178 – 180. (in Chinese)
- [16] 廖勇, 向阳, 吴明亮. 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. 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)
- [17] 伟利国, 车宇, 汪凤珠, 等. 联合收割机割台地面仿形控制系统设计及试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(5): 150 – 154.
WEI Ligu, CHE Yu, WANG Fengzhu, et al. Design and experiment of the ground profiling control system of combine header[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(5): 150 – 154. (in Chinese)
- [18] 王如玥, 吴赞松, 吴学杰. 基于 ARM 的多通道液压伺服控制系统[J]. 工业控制计算机, 2013, 26(6): 108 – 109.
WANG Ruyue, WU Yunsong, WU Xuejie. Multi-channel hydraulic servo control system based on ARM[J]. Industrial Control Computer, 2013, 26(6): 108 – 109. (in Chinese)
- [19] 张铁民, 黄翰, 黄鹏焕. 电动轮式移动小车控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 11 – 18.
ZHANG Tiemin, HUANG Han, HUANG Penghuan. Design and test of drive and control system for electric wheeled mobile car[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(19): 11 – 18. (in Chinese)
- [20] STMicroelectronics. STM32F405/415, STM32F407/417, STM – 32F427/437 and STM32F429/439 advanced ARM®-based 32-bit MCUs[EB/OL]. [2016 – 09 – 01]. http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf/files/DM00031020.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031020.pdf.
- [21] 刘晋浩, 潘海兵, 舒庆. 草方格铺设机器人多体动力学仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 153 – 157.
LIU Jinhao, PAN Haibing, SHU Qing. Multi-body dynamic simulation and experiments of the straw-checkerboard barriers paving robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 153 – 157. (in Chinese)
- [22] 曹卫彬, 孙胃岭, 牛驰, 等. 基于 ANSYS/LS – DYNA 的梳夹式红花采摘装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 123 – 131.
CAO Weibin, SUN Weiling, NIU Chi, et al. Combed safflower picking device based on ANSYS/LS – DYNA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 123 – 131. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181114&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 11. 014. (in Chinese)
- [23] 吕金庆, 于佳钰, 冯雪, 等. 辊式马铃薯分级机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 323 – 332.
LÜ Jinqing, YU Jiayu, FENG Xue, et al. Design and experiment of roller potato grading machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 323 – 332. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190237&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 02. 037. (in Chinese)
- [24] 孙亚朋, 董向前, 宋建农, 等. 振动深松机多组振动深松铲自平衡性能及仿真分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 92 – 99.
SUN Yapeng, DONG Xiangqian, SONG Jiannong, et al. Self-balancing performance and simulation analysis of multi-group vibrating shovels of oscillatory subsoiler[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 92 – 99. (in Chinese)
- [25] 张爱民, 廖培旺, 李伟, 等. 基于 ADAMS 的棉田残茬废膜收集打捆机分析[J]. 农机化研究, 2018, 40(3): 22 – 27.
ZHANG Aimin, LIAO Peiwan, LI Wei, et al. Analysis research of cotton stubble collecting waste film bundling machine based on ADAMS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(3): 22 – 27. (in Chinese)
- [26] 张立勇, 饶洪辉, 罗时挺, 等. 基于 ADAMS 的油茶果采摘机械臂试验设计及优化[J]. 农机化研究, 2017, 39(11): 158 – 163.
ZHANG Liyong, RAO Honghui, LUO Shiting, et al. Experimental design and optimization of camellia fruit picking manipulator based on ADAMS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11): 158 – 163. (in Chinese)