

自走式青饲料收获机仿形系统设计与试验

惠云婷¹ 张国锐¹ 马海明² 李建航² 尤泳¹ 王海翼¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 山东五征高北农牧机械有限公司, 日照 276800)

摘要: 针对复杂环境下自走式青饲料收获机地形适应性差和留茬高度难控制等问题,采用两点探测-电液控制的方式,设计了一套适用于自走式青饲料收获机的割台仿形系统,并开展仿形系统相关试验。在阐述系统整体架构及工作原理的基础上,通过理论计算确定了仿形探测机构、横向仿形调节机构等主要关键部件的结构参数。建立静应力分析模型,得出割台与喂入箱体连接处相关力学特征。利用 ADAMS 仿真软件创建油缸负载特性模型,完成仿形系统的设计与相关优化,确定油缸的最佳作业参数范围。为验证仿形系统的功能,将系统搭载在 4QZ-30 型自走式青饲料收获机上进行试验,以试验过程中割刀前端距地面高度处于 100~150 mm 内的时间所占总试验时长的比率为试验指标,安排道路模拟试验与仿形样机测试,并利用控制系统实时获取割台高度及响应时间,结果表明:仿形探测机构探测高度信息可靠,线性拟合 R^2 为 0.998 7;仿形调节电液控制系统的响应时间均值在 0.16 s 内;仿形系统能够在行驶速度 0~6 km/h 下,对坡度 0°~6° 内的地面进行仿形工作,道路模拟试验过程中,割刀前端距地面高度处于标准范围内的时间所占总试验时长的比率 β 为 90.76%,且 3 组仿形样机测试合格率分别为 86.67%、86.67%、93.33%,提高了自走式青饲料收获机的地形适应能力,降低了留茬高度的控制难度,可为自走式青饲料收获机的仿形技术提供参考。

关键词: 自走式青饲料收获机; 仿形调节; 仿形机构

中图分类号: S225.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0001-09

Header Profiling System of Self-propelled Green Fodder Harvester

HUI Yunting¹ ZHANG Guorui¹ MA Haiming² LI Jianhang² YOU Yong¹ WANG Haiyi¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Shandong Wuzheng Takakita Stockbreeding Machinery Co., Ltd., Rizhao 276800, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor terrain adaptability and difficult control of stubble height of self-propelled green fodder harvester in complex environment, a header profiling system suitable for self-propelled green fodder harvester was designed by using two-point detection-electro-hydraulic control, and the relevant experimental research of profiling system was carried out. On the basis of explaining the overall architecture and specific working principle of the system, the structural parameters of the main key components such as the profiling detection mechanism and the lateral profiling adjustment mechanism were determined through theoretical calculation. The static stress analysis model was established to obtain the relevant mechanical characteristics of the connection between the header and the feeding box. ADAMS simulation software was used to create a cylinder load characteristic model, complete the design and related optimization of the profiling system, and determine the optimal operating parameter range of the cylinder. In order to verify the function of the profiling system, the system was mounted on the 4QZ-30 self-propelled green fodder harvester for testing, and the ratio of the time of the cutting knife front end from the ground height within 100~150 mm to the total test time during the test process was used as the test index, the road simulation test and field profiling harvesting tests were arranged, and the control system was used to obtain the header height and response time in real time, and the results showed that the profiling detection mechanism detected the height information reliably. The linear fitting R^2 value was 0.998 7; the average value of the response time t of the profiling control system was within 0.16 s; the

收稿日期: 2023-06-25 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2022CXGC020704)和山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2021TSGC1422)

作者简介: 惠云婷(1992—),女,讲师,主要从事牧草机械化技术研究,E-mail: hyt@cau.edu.cn

通信作者: 尤泳(1980—),男,副教授,博士生导师,主要从事草业机械研究,E-mail: youyong@cau.edu.cn

profiling system can perform profiling work on the ground with a slope of $0^{\circ} \sim 6^{\circ}$ at driving speed of $0 \sim 6$ km/h, and during the road simulation test, the ratio β of the time when the height of the cutting knife was within the standard range to the total test time was 90.76%, the pass rates of field profiling harvesting tests were 86.67%, 86.67% and 93.33%, which improved the terrain adaptability of the self-propelled green fodder harvester and reduced the difficulty of controlling the stubble height. It can provide a reference for the profiling technology of self-propelled green fodder harvester.

Key words: self-propelled green fodder harvester; profiling adjustment; profiling mechanism

0 引言

当前国内生产的青饲料收获机割台大多数只具备手动升降的功能,较适用于平坦地块的青贮玉米收获工作,且收获工作时难以保证留茬高度,损失率较高,甚至会因割台接触地面造成机械损坏。为了提高收获的质量,减少浪费,自走式青饲料收获机应具备仿形功能,使收获机割台在工作时能够跟据实际田间地面的高度变化,调整自身位置,使留茬高度固定在某一固定范围内^[1-3],进而保证精确的留茬高度,解决地形适应性较差的问题。

我国已有学者在高度探测机构和割台高度调整方面开展了研究。在高度探测方面有采用机械接触式高度探测机构,通过对接地部件随地面高度变化产生的机械信号采集,反映探测机构距地面高度^[4-6],利用超声波、红外线等通过信号源发射信号,再接收回归信号,以两者之间的时间间隔反映地面高度^[7]。在割台高度调整方面,应用PID模糊控制比例电磁阀,实现对收获机割台高度的精确调控^[8-10]。

国外仿形技术研究起步早且更加先进^[11-16],德国克拉斯公司和美国约翰迪尔公司生产的自走式青贮收获机,都采用机械接触方式探测地面高度变化,采用主动式地面仿形,调节割台高度,实现对波形路段的仿形收获工作。

本文基于山东五征高北农牧机械有限公司生产的4QZ-30型自走式青饲料收获机,添加仿形调节机构,为割台的主动仿形提供地面高度信息;优化设计横向仿形调节机构,配合原机的割台升降功能,使割台能够对当前地面进行调平与高度调整;并优化原机液压系统,添加控制系统,使其能够驱动仿形动作,以期收获机根据地面高度变化能够自动做出仿形动作。

1 仿形系统总体方案设计

1.1 收获作业环境

我国青贮玉米的种植方式可分为起垄种植与平作种植,本研究设计的仿形系统主要以采用平作种植的青贮玉米种植地作为工作环境,在此条件下避

免不规范的起垄高度对仿形收获工作后的留茬高度产生影响。相关数据显示,2020年中国耕地平均坡度为 6.5° ,小于 5° 的耕地占比为65%^[17],为使仿形系统有更广泛的适用性,要求仿形系统能对坡度 $0^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 范围内变化的青贮玉米种植地实现仿形收获工作。自走式青饲料收获机工作速度为 $0 \sim 6$ km/h,为了保证收获效率,要求仿形系统所能适用的速度应与正常工作速度范围保持一致。

1.2 系统架构

仿形系统由仿形探测机构、横向仿形调节机构和仿形调节电液控制系统组成,仿形系统架构如图1所示。

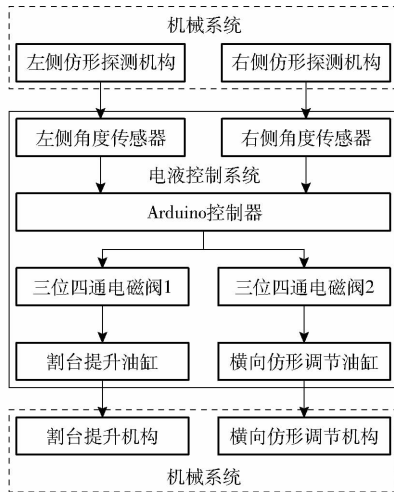


图1 仿形系统架构框图

Fig.1 Block diagram of profiling system

仿形探测机构能实时探测地面高度信息变化^[18-19],横向仿形调节机构搭配原机的割台升降机构能实现对地面的仿形,仿形调节电液控制系统通过处理地面高度信息,对仿形动作启停做出判断并执行,技术参数如表1所示。

2 仿形系统机械机构设计

2.1 仿形探测机构结构设计与原理

仿形探测机构前置于割台两侧的分禾器处,采用接触式探测,应用齿轮传动方式将地面高度变化信息转变为机械信号,如图2所示。

仿形探测机构成对使用,在收获作业时,仿形探测机构随整机前进,仿形轮保持与地面接触并做纯

表 1 仿形系统及原型机技术参数

Tab.1 Technical parameters of profiling system and prototype

参数	数值/形式
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	6 540×2 100×4 850
发动机额定功率/kW	176
割幅/mm	2 000
适用种植模式	平作种植
仿形探测机构探测方式	接触式
横向仿形调节动作范围/(°)	-6~6
适应坡度/(°)	0~6
作业速度/(km·h ⁻¹)	0~6

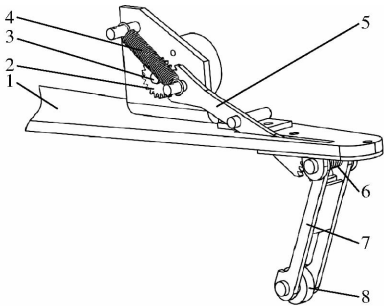


图 2 仿形探测机构

Fig. 2 Profiling detection mechanism

1. 分禾器下底板 2. 传感器齿轮 3. 角度传感器 4. 拉簧 5. 异形齿轮 6. 扭簧 7. 仿形板 8. 仿形轮

滚动运动,仿形板随地面高度变化产生相应摆动动作,摆动动作带动的角度变化通过齿轮传动原理依次传递给异形齿轮、传感器齿轮、角度传感器。扭簧给仿形板提供支持力,保证仿形轮能够一直保持与地面接触,尽可能地降低因碰撞而弹起的状况发生。拉簧为异形齿轮提供拉力,保证异形齿轮与仿形板轮齿一直保持接触状态,提高角度传递的精确性。

探测高度关系如图 3 所示,仿形探测机构随整机前进,割刀最前端距地面的高度由 H_0 变为 H_1 ,仿形板与分禾器下底板夹角由 α_0 变为 α_1 ,几何关系为

$$\Delta H = H_0 - H_1 = l \sin(\alpha_0 - \alpha_1) \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} H_0 = h + r + l \sin \alpha_0 \\ H_1 = h + r + l \sin \alpha_1 \end{cases} \tag{2}$$

式中 H_0 ——移动前割刀最前端距地面高度
 H_1 ——移动后割刀最前端距地面高度
 ΔH ——地面高度变化量
 h ——割刀最前端距仿形板上端铰接处垂直距离
 r ——仿形轮半径
 l ——仿形板两铰接端距离
 α_0 ——移动前仿形板与分禾器下底板夹角
 α_1 ——移动后仿形板与分禾器下底板夹角

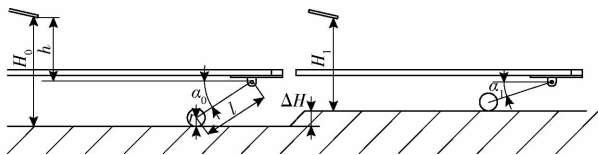


图 3 仿形探测机构探测高度关系图

Fig. 3 Profiling mechanism detection height diagram

2.2 横向仿形调节机构设计与原理

2.2.1 横向仿形调节机构机械结构

横向仿形调节机构通过优化割台与喂入箱体的连接方式实现,将固定连接改为活动连接,使割台能够在喂入箱体的两轴承套上绕一固定点旋转,达到调节割台两侧距离地面的高度差的目的,旋转动作即横向仿形调节动作,由横向仿形调节油缸提供动力,横向仿形调节动作活动范围为左右各 6°(以割台水平时竖直方向为 0°),通过横向仿形调节油缸的行程限制割台旋转角^[20],如图 4 所示。

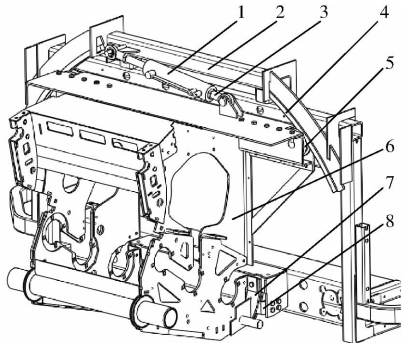


图 4 横向仿形调节机构

Fig. 4 Transverse profiling adjustment mechanism

1. 横向仿形调节油缸 2. 割台主框架 3. 关节轴承 4. 上弯轨 5. 轴承套 6. 喂入箱体 7. 下弯轨 8. 滑块

在收获作业过程中割台随整机前进,并在地面高度发生变化,导致割台两侧的探测高度差值超出固定范围时,由控制器发出电信号指令,液压系统执行油缸伸缩运动,做出横向仿形调节动作,使用割台对当前地面进行调平,调平过程中仿形探测机构探测高度也会随之变动,在割台两侧的探测高度差值回到固定范围内时,停止横向仿形调节动作。通过不断重复对探测高度的判断,保证割台长时间和当前地面接近平行状态。

割台转角与横向仿形调节油缸伸缩量变化关系如图 5 所示,点 O_1 为液压缸与喂入箱体的铰接中心点,点 O_0 为割台旋转中心,液压缸与割台的铰接中心点在点 B_0 时割台与地面平行,液压缸与割台的铰接中心点由点 B_0 移动至点 B_1 ,横向仿形调节油缸长度由 x_0 变为 $x_0 + \Delta x$,对应的割台转角变化量为 $\Delta \theta$,几何关系为

$$\theta_0 + \Delta \theta = \arccos \frac{R^2 + L^2 - (x_0 + \Delta x)^2}{2RL} \tag{3}$$

其中

$$\theta_0 = \arccos \frac{R^2 + L^2 - x_0^2}{2RL}$$

式中 θ_0 ——液压缸与割台和喂入箱体的两铰接中心点初始夹角

R ——液压缸与割台的铰接中心点到割台旋转中心的距离

L ——液压缸与喂入箱体的铰接中心点到割台旋转中心的距离

x_0 ——液压缸与割台和喂入箱体的两铰接中心点间的距离

Δx ——液压缸活塞移动量

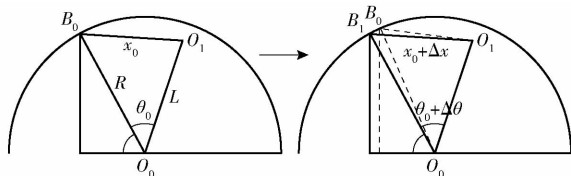


图5 横向仿形调节机构工作原理图

Fig. 5 Working principle diagram of transverse profiling adjustment mechanism

2.2.2 横向仿形调节机构静应力

将横向仿形调节机构主要受力部件的三维模型在 SolidWorks 软件中打开,通过使用 SolidWorks 软件的 Simulation 功能对各个受力部件进行静应力分析。

对割台主框架进行固定约束,对上滑轨与喂入箱体旋转支点接触位置设置载荷 7 500 N,如图 6 所示割台活动连接部位应力最大,为 182.6 MPa,位置为结构件焊接处,满足强度要求。

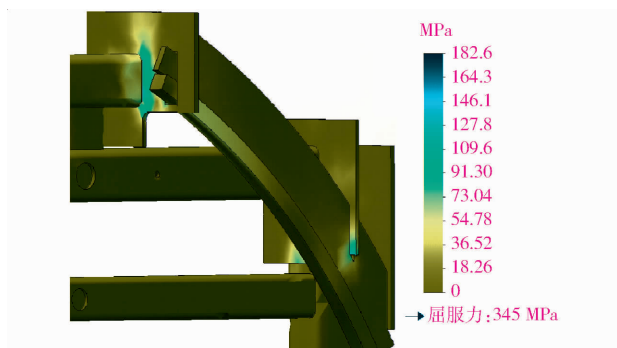


图6 割台活动连接处应力分布云图

Fig. 6 Stress distribution cloud at active junctions of header

对喂入箱体与切碎滚筒的连接处进行固定约束,对喂入箱体两侧的旋转支点处设置载荷 7 500 N,如图 7 所示,割台活动连接部位应力最大,为 286.5 MPa,位置为结构件焊接处,满足强度要求。

2.2.3 横向仿形调节油缸负载

在执行仿形动作的过程中,为了解横向仿形调节液压系统的负载变化情况,同时分析横向仿形调节机构是否合理,采用 ADAMS 软件分析自走式青饲料收获机割台在正常工作情况下的横向仿形调节

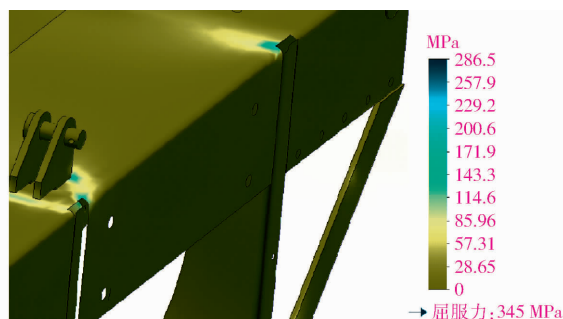


图7 喂入箱体旋转支点处应力分布云图

Fig. 7 Feed stress distribution cloud at rotating fulcrum of box

油缸所受负载的变化情况^[21]。

在 ADAMS 软件中,对模型进行约束与相关设置,由于导入的三维模型为筒体模型,通过设置割台装配体总重及质心方式模拟真实受力环境,割台总质量为 750 kg,通过对企业内部三维图测量确定割台重心位置,通过 STEP 函数确定横向仿形调节油缸的运动特征,驱动函数为 STEP (time, 0.0, 0.0, 4, 0.08) + STEP (time, 4, 0.08, 12, -0.08) + STEP (time, 12, -0.08, 16, 0.0),使横向仿形调节油缸在 0 ~ 4 s 内伸长 0.08 m;在 4 ~ 12 s 内收回 0.16 m;在 12 ~ 16 s 内伸长 0.08 m,回到初始位置。仿真结果如图 8 所示。

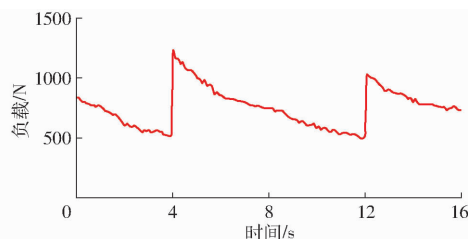


图8 横向仿形调节油缸负载变化曲线

Fig. 8 Transverse profiling adjusted cylinder load change curve

当割台移动到极限位置过程中,所受负载逐渐减小,当割台移出极限位置时,所受负载突增至较大值后逐渐减小。横向仿形调节油缸所受负载最大值为 1 242.8 N,即仿形调节电液控制系统能提供的拉力最小值,受力变化情况与受力大小合理,负载最大时为割台于左侧极限位置。

3 仿形调节电液控制系统设计

3.1 仿形调节液压系统设计

仿形调节液压系统作为仿形调节动作的执行系统,根据实际工作需求,对样机的液压系统进行分析、优化,红色虚线框内为新增元件,优化后仿形调节液压系统如图 9 所示。

横向仿形调节油缸为横向仿形调节动作提供动力,并搭配两单向节流阀实现横向仿形调节动作的

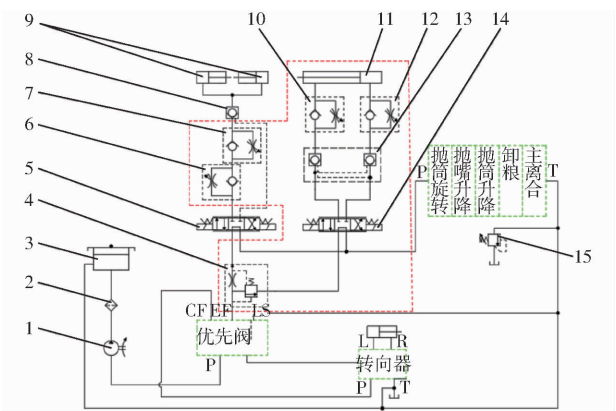


图 9 仿形调节液压系统原理图

Fig. 9 Schematic of profiling adjustment hydraulic system

1. 齿轮泵 2. 滤油器 3. 油箱 4. 单路稳定分流阀 5、14. 三位四通电磁换向阀 6、7、10、12. 单向节流阀 8. 液控单向阀 9. 割台提升油缸 11. 横向仿形调节油缸 13. 双向液压锁 15. 溢流阀

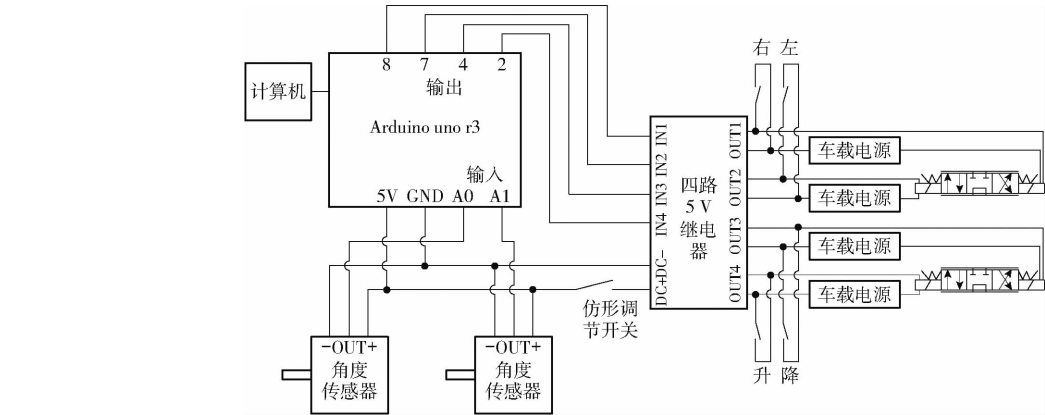


图 10 仿形调节控制系统硬件接线图

Fig. 10 Profiling control system hardware wiring diagram

在继电器的电源线上设置仿形调节开关,通过对继电器的电源控制进而对主动仿形动作的启停进行切换;两角度传感器的模拟输出信号分别传输至 A0 和 A1 端口;Arduino uno r3 控制板的 2、4、7、8 号端口分别连接四路 5 V 继电器的 4 个数字量输入口,通过高低电平控制每个继电器的开闭;2 个三位四通电磁换向阀的每个电源接口串联 24 V 车载电源,每条回路都可以通过继电器的开闭或手动开关的开闭控制回路的开闭。

仿形调节控制程序总体运行流程图如图 11 所示。整机启动后,保持仿形调节开关和 4 个仿形动作开关为断开状态,接通控制板的电源,此时地面高度信息探测模块启动,仿形动作判断模块启动,计算机终端屏幕显示当前割台距地面高度信息,由于所有开关均为断开状态,割台不会执行仿形动作。根据当前需求选择工作模式,在手动模式下可以自由调整割台姿态,一般运用在运输过程中,手动将割台提升至距地面较高的位置。进行仿形收获工作

调速,解决因有效面积不一致,割台左旋和右旋速度不一致的问题;割台提升油缸搭配两反向安装的单向节流阀,实现对纵向仿形调节动作上升与下降的分别调速;优先阀后安装单路稳定分流阀,保证割台的纵向仿形调节动作与横向仿形调节动作能够同时执行。两电磁阀受电信号控制换位,实现液压缸运动。

3.2 仿形调节控制系统设计

仿形调节控制系统作为仿形调节动作的启停控制系统,需要完成对地面高度变化信息的处理与判断仿形动作的启停,仿形调节控制系统硬件连接如图 10 所示。

Arduino uno r3 控制板由计算机供电、程序烧录和显示数据;由 Arduino uno r3 控制板的 5 V 电压输出端口对两角度传感器和四路 5 V 继电器供电,并

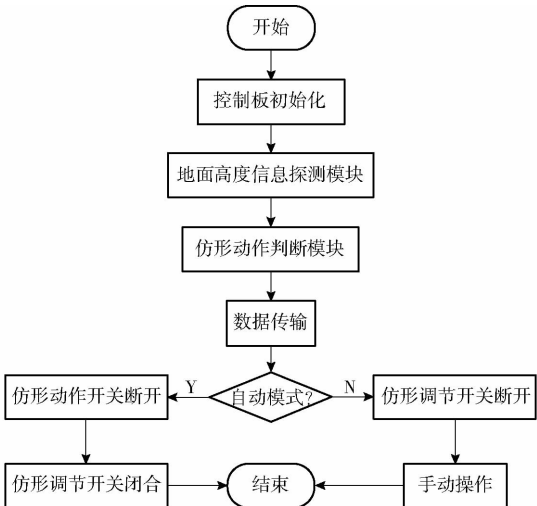


图 11 仿形调节控制程序的总体程序运行流程图

Fig. 11 Overall program flowchart of profiling control program

时,先将整机驾驶至适当位置,在保持 4 个仿形动作开关为断开状态下,闭合仿形调节开关,继电器得电,控制板传输的电信号能够作用于继电器,开始根据预设程序与仿形探测机构获取的地面高度变化信

息进行仿形收获工作。

地面高度信息探测程序运行流程如图 12 所示,主要功能为通过实时处理割台两侧仿形探测机构角度传感器的模拟电压信号,自动将其转换为能够进行运算的模拟值,并通过函数关系计算出割台两侧距地面高度,同时为了减小探测误差对仿形控制进行判断,对实时获取的模拟电压信号进行均值处理,即取 Arduino uno r3 控制板在最新的一段时间内采集模拟值均值,作为执行仿形动作的判断依据。

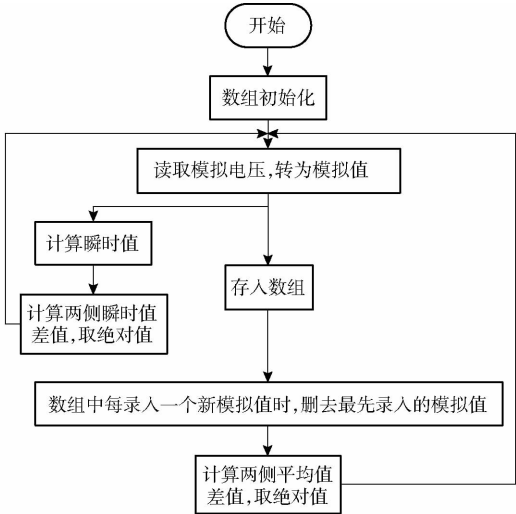


图 12 地面高度变化信息探测程序运行流程图

Fig. 12 Flowchart of operation of ground altitude change information detection program

仿形动作判断程序将根据上述信息判断并执行对应仿形调节动作,判断流程如图 13 所示,通过对比两侧高度差值与高度阈值来判断仿形动作的启停。

4 仿形调节系统性能试验

4.1 仿形调节系统试制

自走式青饲料收获机仿形系统结构件的生产、焊接、装配,仿形调节电液控制系统的优化和装配均在山东五征高北农牧机械有限公司进行,完成装配后仿形系统如图 14 所示。

4.2 仿形探测机构探测高度性能

将仿形探测机构置于硬质桌面上,利用卷尺对分禾器下底板距桌面的实际高度进行测量,手动控制分禾器下底板升降高度,并配合使用数显倾角盒,保证分禾器下底板与桌面接近平行状态,使卷尺测量仿形探测机构当前的实际高度时能获得更精确的数值。单次移动 5 mm,试验结果如图 15 所示。

对实际高度与探测高度进行线性拟合关系运算,得出拟合公式为

$$y = 0.9716x + 2.4461 \quad (4)$$

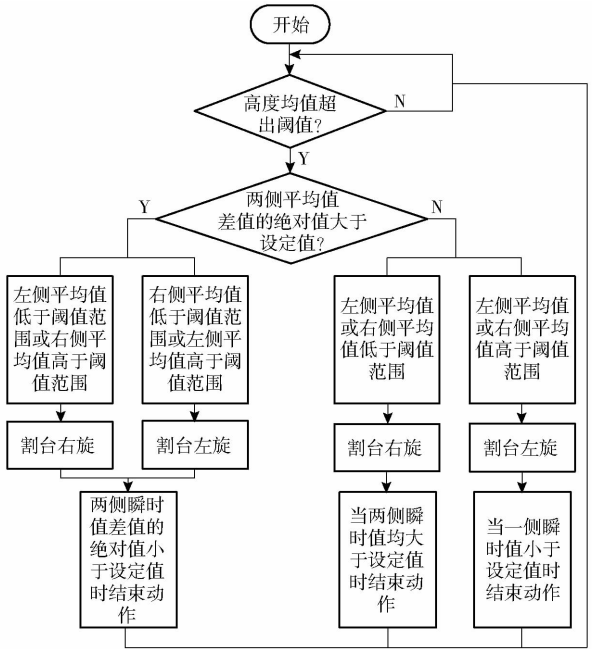


图 13 仿形动作判断程序流程图

Fig. 13 Flowchart of profiling action judgment program



图 14 仿形系统装配图

Fig. 14 Assembly drawing of profiling system

1. 仿形调节电液控制系统 2. 横向仿形调节机构 3. 仿形探测机构

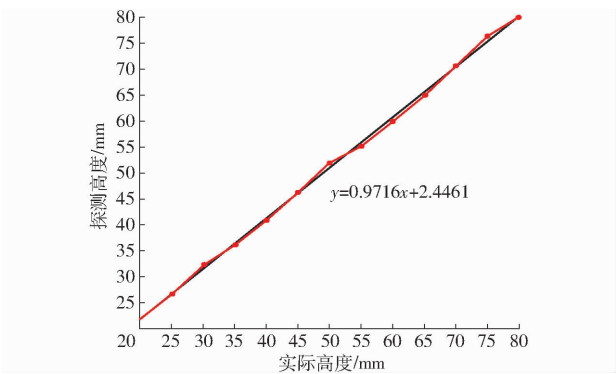


图 15 仿形探测机构探测高度测试值

Fig. 15 Profiling mechanism detection height test values

线性拟合 R^2 为 0.998 7,证明仿形探测机构探测得到的高度有效。

4.3 仿形调节电液控制系统响应时间

仿形调节电液控制系统的响应时间是指从发出仿形动作控制指令,到仿形调节机构开始做出仿形动作的延迟时间。仿形调节电液控制系统的响应时间分析如图 16 所示。

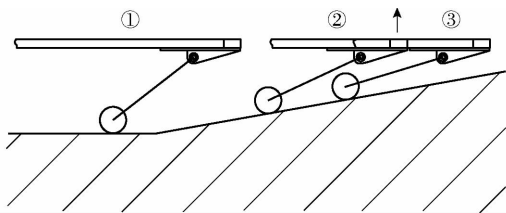


图 16 响应时间分析图

Fig. 16 Response time analysis graph

仿形调节机构于位置①时 在平缓地面上前进；由位置①行驶至位置②过程中，仿形调节机构遇上坡，分禾器下底板高度不变，仿形板及仿形轮逐渐随地面升高；行驶至位置②时，探测得到的高度超出设定范围，控制板输出电信号，控制液压系统做出对应仿形调节动作；由位置②行驶至位置③过程中，此过程用时即仿形调节电液控制系统的响应时间，过程中继电器执行开或闭动作，三位四通电磁阀执行换位动作，以及其他影响到响应时间的因素，过程中仿形调节机构的分禾器下底板高度不变；行驶至位置③时，仿形调节动作开始执行，割台与仿形调节机构被调整至适当位置。

为了测量仿形调节电液控制系统的响应时间，编写相应控制程序，记录从控制板输出电信号控制执行仿形调节动作开始，到仿形探测机构移动 4 mm 时所用时间，输出记录时间即为仿形调节电液控制系统响应时间。分别对纵向仿形调节动作和横向仿形调节动作进行测试，试验结果如表 2 所示。

表 2 仿形调节电液控制系统响应时间测试结果

Tab.2 Profiling adjustment electrohydraulic control system response time test results ms

响应时间	割台运动状态			
	上升	下降	左旋	右旋
第 1 次	136	135	113	121
第 2 次	143	157	133	122
第 3 次	152	134	122	137
第 4 次	137	134	127	125
第 5 次	141	138	120	115

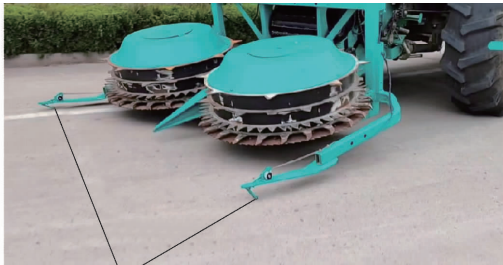
由表 2 可知，横向仿形调节动作的响应时间与纵向仿形调节动作的响应时间均在 160 ms 内，仿形调节液压系统的响应时间较为稳定且迅速。

4.4 波形路段仿形试验

为了测试样机仿形调节的实际效果，选取坡度变化符合设计要求的特定地面，测试仿形调节的性能。试验于 2022 年 12 月 13 日在山东五征高北农牧机械有限公司附近进行，所选路段通过数显倾角盒，检测此段路面坡度信息，得出坡度最大值为 7.15°，符合试验需求。

试验时样机以斜向从下至上以速度 6 km/h 行

驶，并在途中转向一次，此时样机所走过的路面即是左右不等高且变化的波形路面，能够触发纵向仿形动作与横向仿形动作，此测试重在分析仿形调节系统在波形路段上的仿形调节性能，故只对探测高度的瞬时值进行分析，通过对比试验过程中割刀前端距地面高度处于标准范围内的试验时间占总试验的时长比值检验仿形效果，试验现场如图 17 所示。根据记录数据，绘制割刀前端距地面高度变化折线如图 18 所示。



左右高度不一致

图 17 波形路段仿形试验

Fig. 17 Waveform section profiling test

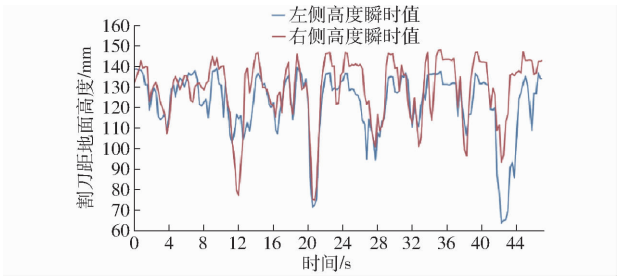


图 18 波形路段试验探测高度瞬时值

Fig. 18 Waveform section test detected instantaneous value of altitude

图 18 记录了割台左侧与右侧的割刀前端距地面高度瞬时值，根据技术要求，割刀前端距地面高度标准为 100 ~ 150 mm。仿形调节系统波形路段仿形试验总时长为 46 s，其中两侧探测高度均处在 100 ~ 150 mm 的时长为 41.75 s，割刀前端距地面高度处于标准范围内的时间所占总试验时长的比率 β 为 90.76%，表明研究设计的仿形调节系统对于有一定坡度变化的地面具有良好的仿形调节效果；割台两侧分禾器触地次数为 3 次，割刀触地次数 0 次，且仿形探测机构无明显变形，表明仿形调节系统对于有一定坡度变化的地面具有良好的通过性。

4.5 样机试验及分析

试验于 2023 年 9 月 4 日在山东五征高北农牧机械有限公司试验基地进行割台仿形系统性能试验，试验基地青贮玉米种植模式为平作种植，无倒伏现象，由于前序降雨土质表层干燥而内部较松软，作业机为山东五征高北农牧机械有限公司生产的 4QZ-30 型自走式青饲料收获机，搭载割台仿形系

统并在道路测试样机基础上安装喂入辊及传动系等,在目标试验基地进行仿形样机测试,如图 19 所示。试验设备包括:自走式青饲料收获机一台、割台仿形系统、卷尺。



图 19 仿形样机测试
Fig. 19 Profiling harvest test

在前期波形路段仿形试验的基础上,设定 3 组试验,作业速度分别设为 6、5、4 km/h,割刀前端距地面高度为 100 ~ 150 mm,即留茬高度为 100 ~ 150 mm。每组试验选取长 15 m 为一个试验区间,每个区间收获 3 行青贮玉米,在完成仿形样机测试后,对每组试验区间内的青贮玉米留茬高度进行测量,沿着收割方向,每隔 1 m 在每列青贮玉米中选取 1 株青贮玉米留茬进行测量,即每隔 1 m 选取 3 个测量点测量留茬高度并得出留茬高度均值。将每组试验中所测得留茬高度均值处于标准范围内的记为合格,每组试验中合格的留茬高度均值占测试数据总量的比率为合格率 p ,将合格率 p 作为评价指标。仿形样机测试收获效果如图 20 所示。



图 20 仿形样机测试收获效果总览

Fig. 20 Overview of harvesting effect of profiling harvest test

完成试验后,使用卷尺对待测青贮玉米留茬进行高度测量,如图 21 所示。记录仿形样机测试结果如表 3 所示,总结仿形样机测试结果得出在工作速度 6、5、4 km/h 下,3 组试验留茬高度合格率 p 分别为 86.67%、86.67%、93.33%,3 组试验的合格率均处于较高水平,样机搭载的割台仿形系统能有效地控制青贮玉米留茬高度。试验表明,作业速度较快时,单位时间内样机的前进距离较长,坡度变化引起的地面起伏量较大,割台仿形系统因较为固定的响应时间导致合格率低于低工作速度下的合格率。在低工作速度下能够明显的提高留茬高度的合格率,但会降低工作效率。



图 21 仿形样机测试数据采集过程

Fig. 21 Profiling harvest test data acquisition process

表 3 仿形样机留茬高度均值

Tab. 3 Profiling harvest test results mm

序号	速度/(km·h ⁻¹)		
	6	5	4
1	123.63	114.95	132.18
2	122.74	106.15	124.77
3	107.67	129.32	127.26
4	113.59	82.69	131.48
5	133.26	138.26	138.38
6	132.04	104.22	80.31
7	86.99	136.76	109.26
8	138.19	112.30	116.62
9	102.90	118.68	122.86
10	92.70	124.32	113.81
11	138.57	128.04	136.58
12	133.16	95.95	134.41
13	132.67	106.28	110.70
14	112.15	123.63	118.02
15	102.79	145.22	107.40

在仿形样机测试过程中,割台仿形系统运行稳定,未出现因动力不足等问题导致作业停滞或中断,仿形探测机构仿形轮长时间保持接地,两侧分禾器下底板距地面高度长时间保持在合理高度范围内,在完成试验后,割台仿形系统弯轨、仿形探测机构等活动构造处与静应力分析中所受应力最大处并未出现明显形变。

5 结论

(1)基于对青贮玉米田间作业环境的分析,提出了自走式青饲料收获机仿形系统的工作特性:实现收获机能在工作速度 0 ~ 6 km/h 内,割台能够对坡度为 0° ~ 6° 内变化的无垄种植的青贮玉米田间地面进行仿形工作,保证青贮玉米留茬高度范围为 100 ~ 150 mm。

(2)基于原机的结构特征,对仿形探测机构、横向仿形调节机构和仿形调节电液控制系统进行了设计。利用静应力分析对横向仿形调节机构关键受力部位进行强度校核;通过动力学仿真分析了横向仿形调节油缸的负载变化。

(3)通过仿形调节系统波形路面仿形试验,

测试了仿形调节系统在波形路面的通过性与仿形效果,结果为割刀前端距地面高度处于标准范围内的时间所占总试验时长的比率 β 为 90.76%,割台两侧分禾器触地次数为 3 次,割刀触地次数 0 次,且 3 组仿形样机测试合格率分别为 86.67%、86.67%、93.33%,表明仿形调节系统对于有一定坡度变化的地面具有良好的通过性与仿形效果。

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]. 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]. Transactions of the Chinese society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 44-50. (in Chinese)

[2] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 1-13. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 汤庆,吴俊,蒋兰,等. 油菜耕整移栽联合作业机液压仿形系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(11):95-102.
TANG Qing, WU Jun, JIANG Lan, et al. Design and test of hydraulic profiling system for rape seedling combined transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 95-102. (in Chinese)

[5] 赵金辉,刘立晶,杨学军,等. 播种机开沟深度控制系统的设计与室内试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):35-41.
ZHAO Jinhui, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and laboratory test of control system for depth of furrow opening[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 35-41. (in Chinese)

[6] 陈智锴,吴惠昌,张延化,等. 半喂入四行花生联合收获机自动限深系统研制[J]. 农业工程学报,2018,34(15):10-18.
CHEN Zhikai, WU Huichang, ZHANG Yanhua, et al. Development of automatic depth control device for semi-feeding four-row peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(15): 10-18. (in Chinese)

[7] 韩豹,杨亚楠,王宏伟,等. 苗间除草部件入土深度 PID 自动控制系统设计与台架试验[J]. 农业工程学报,2018,34(11):68-77.
HAN Bao, YANG Ya'nan, WANG Hongwei, et al. Design of PID automatic control system for depth into earth of intra-row weeding components and its bench experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 68-77. (in Chinese)

[8] 杨银辉. 基于超声波传感器的割台高度自动控制系统研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2007.
YANG Yinhui. Research of header height automatic controlling system based on ultrasonic sensor[D]. Yangling:Northwest A&F University,2007. (in Chinese)

[9] 官元娟,金忠博,白晓平,等. 甘蔗收获机割台随动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):119-128.
GONG Yuanjuan, JIN Zhongbo, BAI Xiaoping, et al. Design and experiment of servo control system for sugarcane header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 119-128. (in Chinese)

[10] 刘伟健,罗锡文,曾山,等. 基于模糊 PID 控制的再生稻自适应仿形割台性能试验与分析[J]. 农业工程学报,2022,38(10):1-9.
LIU Weijian, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Performance test and analysis of the self-adaptive profiling header for ratooning rice based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(10): 1-9. (in Chinese)

[11] SUOMI P, OKSANEN T. Automatic working depth control for seed drill using ISO 11783 remote control messages[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2015, 116: 30-35.

[12] LINDEN S V D, MOUAZEN A M, ANTHONIS J, et al. Infrared laser sensor for depth measurement to improve depth control in intra-row mechanical weeding[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(3): 309-320.

[13] SAJAD K. Automatic on-line depth control of seeding units using a non-contacting ultrasonic sensor[J]. International Journal of Natural and Engineering Sciences, 2010, 6(2): 39-42.

[14] SRITARAPIPAT T, RAKWATIN P, KASETKASEM T. Automatic rice crop height measurement using a field server and digital image processing[J]. Sensors, 2014, 14(1): 900-926.

[15] NIELSEN S K, MUNKHOLM L J, LAMANDÉ M, et al. Seed drill instrumentation for spatial coulter depth measurements[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 207-214.

[16] ZOERB T L K C. Automatic header-height control for grain crops[J]. Transactions of the ASAE, 1965, 8(2): 284-287.

[17] 杨冉. 基于多源遥感大数据的中国退耕还湿潜力评价[D]. 长春:吉林大学,2022.
YANG Ran. Identifying the potential of returning cropland to wetland in China based on multisource remotely sensed big data[D]. Changchun:Jilin University,2022. (in Chinese)

[18] 李涛,李娜,刘存根,等. 薯类收获机挖掘深度自动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(12):16-23.
LI Tao, LI Na, LIU Cungen, et al. Development of automatic depth control system employed in potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 16-23. (in Chinese)

[19] 李玉环,孟鹏祥,耿端阳,等. 玉米播种深度智能调控系统研究[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):62-68.
LI Yuhuan, MENG Pengxiang, GENG Duanyang, et al. Intelligent system for adjusting and controlling corn seeding depth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 62-68. (in Chinese)

[20] 任星臣. 一种青贮机割台仿形装置: 202020447351.8[P]. 2020-11-10.

[21] 陈立平. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2005.