

高速免耕玉米播种单体镇压力主动调控系统设计与试验

付作立 官志超 褚青昕 李海宇 张墨林 黄玉祥

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对高速免耕播种条件下镇压系统稳定性难以保障问题,提出镇压力主动调控技术方案,设计了基于电液控制的玉米播种单体镇压系统。提出系统总体结构方案,并通过对播种单体运动和镇压部件与土壤相互作用力学分析,确定了镇压力控制过程。完成了电液控制系统设计和硬件选型,分别采用 AMEsim 仿真分析和阶跃响应试验,开展了液压执行机构和电控系统设计,采用自动 PID 控制方式,系统调节时间均值为 1.9 s,稳态误差均值为 1.9 N,超调量均值为 2.0%,均明显优于机械调节方式。开展了正弦曲线地表土槽验证试验,对比研究不同调节方式和地表条件对镇压力稳定性的影响,结果表明:当目标镇压力为 300 N 时,相较传统的机械调节方式,电液控制方式镇压力均方根误差平均低 30.1%,种沟土壤坚实度变异系数平均低 24.46 个百分点;正弦曲线地表竖直方向上的最大位移分别为 0、20、40 mm 时,随着目标镇压力增加,镇压力均方根误差变化不显著,最大差值为 39.2 N。基于电液控制的玉米播种单体镇压系统能够在不同地面条件下保障镇压作业质量,该研究可为旱区播种作业过程中湿润种床构建以及高速免耕条件下玉米播种提供技术和装备支撑。

关键词: 玉米播种机; 镇压力; 电液控制系统; 高速; 免耕

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)11-0273-12

OSID:



Design and Test of Active Control System for Soil Compaction of High Speed No-tillage Maize Planter

FU Zuoli GONG Zhichao CHU Qingxin LI Haiyu ZHANG Molin HUANG Yuxiang

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: It is difficult to guarantee the stability of soil compaction system under the condition of high speed no-tillage seeding. Therefore, a technical scheme of automatic soil compaction control was proposed, and the electro-hydraulic control system for soil compaction of maize planter was designed. The overall structure of the system was proposed, and the pressure control process was determined through the mechanical analysis of the movement of the seeding monomer and the interaction between suppression wheel and soil. The electro-hydraulic control system design and hardware selection were carried out. AMEsim simulation analysis and step response test were used respectively to design the hydraulic actuator and electronic control system. The results showed that compared with the traditional mechanical regulation, the adjustment accuracy and stability of the hydraulic actuator using PID control were improved. The mean adjustment time of the control system for soil compaction was 1.9 s, the mean steady-state error was 1.9 N, and the mean overshoot was 2.0%. It was obviously better than mechanical control. Sinusoidal surface soil trough verification test was adopted, and comparative experimental study was carried out on the influence of different adjustment methods and surface conditions on the stability of soil compaction. The results showed that when the target pressure was 300 N, the RMSE of the pressure using electro-hydraulic control was 30.1% lower on average and the variation coefficient of soil compaction was 24.46 percentage points lower than that by using traditional mechanical control. When the maximum surface displacement in the vertical direction of sine curve was 0 mm, 20 mm and 40 mm, respectively, the variation of RMSE was not significant with the increase of the target force, and the maximum difference was 39.2 N. The automatic soil compaction control system of maize planter based on electro-hydraulic control can guarantee the compaction operation quality under different work conditions.

收稿日期: 2024-07-10 修回日期: 2024-08-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000405)和陕西省重点研发计划项目(2024NC-YBXM-008、2023-YBNY-226)

作者简介: 付作立(1987—),男,副教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail: fuzuoli@nwsuaf.edu.cn

It provided technical and equipment support for the construction of seed bed and maize sowing under the condition of high speed and no tillage in arid region.

Key words: maize planter; compaction pressure; electro – hydraulic control system; high speed; no-tillage

0 引言

机械镇压是提高种床蓄水保墒能力的重要手段,是旱区农业机械化生产技术的重要组成。围绕农业机械高效、优质生产需求,解决高速作业条件下镇压部件因田间振动导致作业质量下降问题,对提高播种作业质量具有重要意义^[1-3]。大量研究和实践结果表明,传统的农机触土部件在土壤硬度高、地表起伏大、作业速度高的条件下作业质量显著降低^[4-6],对此,国内外学者分别在播深调控、割台仿形等方面,提出了主动仿形思路,采用机电液一体化系统,实现精准检测、控制,极大提高了装备作业质量^[7-10]。

信息实时检测是实现精准控制的必需条件,在地面信息检测方面,目前主要包括直接检测和间接检测。其中直接检测主要采用超声波传感器^[11-13]、红外激光传感器^[14]、角度传感器^[15-17]或采用多传感器融合^[18]等手段测量机具位姿或距离;间接检测常采用 PVDF 压电薄膜传感器^[19]、Flex 弯曲传感器^[20]、轴销传感器^[21-23]等测量压力信号,检测机具作业状态参数。

综上所述,主动调节方法是实现播深精准调控的重要实现手段,基于传感器直接或间接检测的地面信息,通过控制系统主动对开沟器等装置位置进行调节,能够满足高速作业下快速调节,提高播种质量的需求。但在高速免耕条件下对镇压系统镇压力主动调节的研究较少,这与镇压系统与土壤互作关系更加复杂、镇压力精准检测难度大、镇压系统受到地面波动影响更大有关,现有研究在系统响应时间和稳定性方面已基本满足需求,但在不同地面条件和多目标镇压力等应用场景的可靠性方面还有待深入研究。本文提出工作位置检测、主动调节的技术方案,精准控制镇压力,提高镇压质量。以玉米播种机单体为研究对象,开展基于电液控制的镇压系统设计和试验,完成系统总体结构和工作原理分析、电液控制系统设计和土槽验证试验,实现镇压力实时检测和控制,为玉米播种机镇压系统设计优化提供技术和装备支撑。

1 系统结构与工作原理

1.1 系统总体结构和组成

基于电液控制的玉米播种单体镇压系统主要包

括播种单体、电液控制系统、搭载平台和其他机械部分,其主要结构如图 1 所示。搭载平台一端连接播种单体,另一端通过三点悬挂装置与动力装置挂接。电液控制系统分置在搭载平台和播种单体上,其作用是实时检测镇压轮工作参数并控制液压油缸执行相应动作,完成对播种单体镇压轮控制。

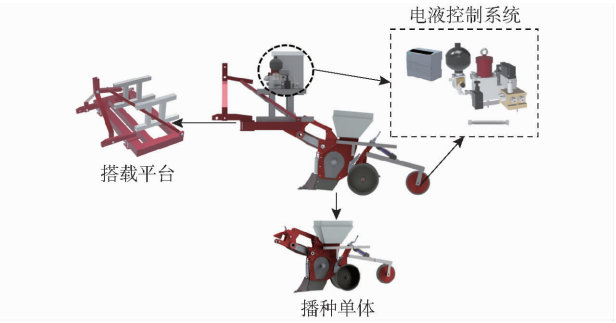


图 1 系统组成

Fig.1 Components of system

电液控制系统整体结构如图 2 所示,主要包括信号检测与处理系统和液压执行机构。其中,信号检测与处理系统由控制终端、镇压力传感器和 PLC 组成,主要完成镇压力检测、数据信号处理和调节信息发送;液压执行机构由液压回路、输油管路、液压缸等组成,主要完成控制信号响应、控制液压缸伸缩和调节镇压力。

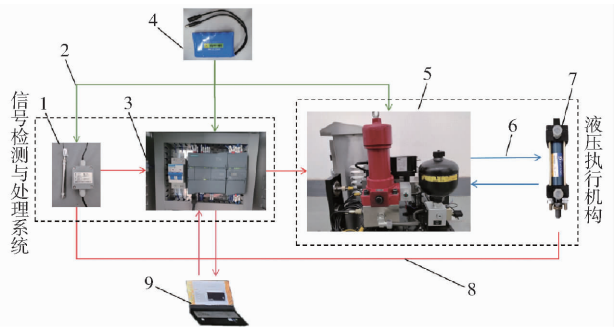


图 2 控制系统整体结构图

Fig.2 Structure diagram of whole control system

1. 镇压力传感器 2. 供电线路 3. PLC 4. 电源 5. 液压回路
6. 输油管路 7. 液压缸 8. 数据传输线路 9. 控制终端

镇压力传感器安装位置如图 3 所示,其替代原有轮轴穿过镇压轮轴孔,两端固定于卡槽内。卡槽带方形沉孔,限制传感器的轴向位移和转动,且可调节传感器角度并由紧固螺栓固定。镇压轮受外力时在轮体和卡槽的共同作用下对镇压力传感器产生作用力,从而实现镇压轮对地压力检测。

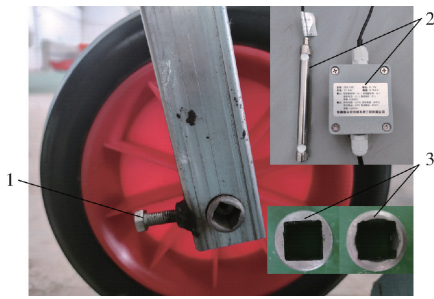


图 3 镇压力传感器安装示意图

Fig. 3 Installation diagram of pressure sensor

1. 紧固螺栓 2. 镇压力传感器 3. 卡槽

1.2 电液控制系统原理

镇压力控制系统工作原理如图 4 所示,工作前在终端机上操作控制面板输入目标镇压力,镇压力传感器检测实时镇压力并发送至 PID 控制器,通过数据处理,控制器向液压执行机构发送控制信号,控制液压缸伸缩,调整镇压轮位姿,实现调节镇压力的目的。镇压力变化将使镇压力传感器信号强度改变,PID 控制器再次接收信号实现闭环控制。

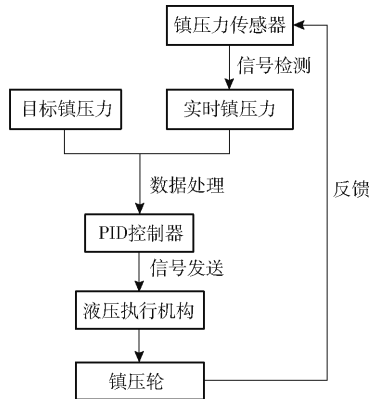


图 4 镇压力控制系统工作原理图

Fig. 4 Working principle of pressure control system

1.3 镇压力控制过程

玉米播种单体作业时,液压缸伸缩量将影响镇压轮竖直高度。图 5 为播种单体结构简图,通过杆件分析得到镇压轮位姿与液压缸伸缩量的量化关系,为控制系统设计提供依据。图中镇压轮支撑杆两端分别与播种单体和镇压轮铰接,中部与液压缸铰接,其前、中铰接点距离为 L_1 ,前、后铰接点距离

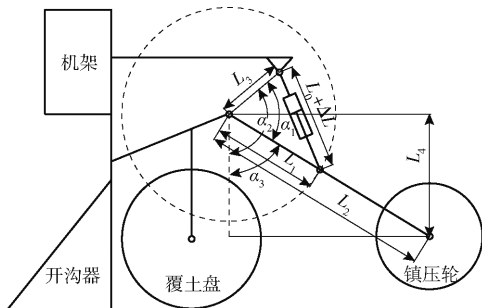


图 5 播种单体结构简图

Fig. 5 Structural diagram of planter unit

为 L_2 ,前铰接点到液压缸另一铰接点距离为 L_3 ,镇压轮前铰接点到前铰接点垂直方向的距离为 L_4 。 L_0 为液压缸的长度, ΔL 为液压缸伸长量, α_1 为前、中铰接点连线和前铰接点与液压缸另一铰接点连线之间的夹角, α_2 为前铰接点与液压缸另一铰接点连线和垂直方向的夹角, α_3 为前、后铰接点连线和垂直方向的夹角。

根据杆件分析可得

$$\begin{cases} \alpha_1 = \arccos \frac{L_1^2 + L_3^2 - (L_0 + \Delta L)^2}{2L_1L_3} \\ \alpha_3 = \alpha_2 - \alpha_1 \\ L_4 = L_2 \cos \alpha_3 \end{cases} \quad (1)$$

根据玉米播种单体结构可得

$$L_4 = L_2 \cos \left(\alpha_2 - \arccos \frac{L_1^2 + L_3^2 - (L_0 + \Delta L)^2}{2L_1L_3} \right) \quad (2)$$

镇压过程土壤变形较为复杂,受其结构和接触参数影响,借鉴刘宏俊^[24]基于准静态的镇压轮与土壤互作力学模型进行力学分析,如图 6 所示。

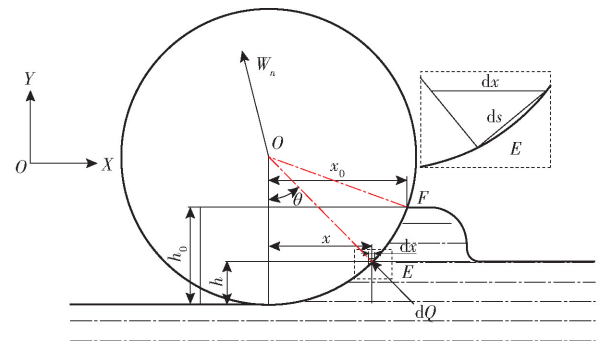


图 6 镇压轮与土壤互作力学模型

Fig. 6 Force analysis of press wheel and soil

图 6 中, h 为镇压轮行进至点 E 处时的下陷量; h_0 为镇压轮遇到土包时对应的最大下陷量; θ 为下陷量 h 对应的圆心角; x 为点 E 的 X 轴坐标值; x_0 为点 F 的 X 轴坐标值; dx 为点 E 附近弧长 ds 沿 X 轴方向位移; W_n 为土壤总抗压反作用力。此处刚性镇压轮运动可近似看作无滑移纯滚动。

dQ 为触土面点 E 对应的微小段的抗压反作用力,即

$$dQ = pbds \quad (3)$$

式中 b ——镇压轮宽度, m

p ——在点 E 深度处的抗压强度, kPa

因刚性镇压轮受到的载荷与土壤总抗压反作用力 W_n 等大反向,故

$$W_n = \int dQ \cos \theta = \int pbds \cos \theta = \int pb dx \quad (4)$$

由 Bekker 经验公式确定土壤抗压强度 p 与下陷量 h 关系方程为

$$p = kh^n \tag{5}$$

式中 k ——土壤模量 n ——土壤变形指数
代入式(4)可知

$$W_n = \int_0^{x_0} kh^n b dx \tag{6}$$

由图 6 中几何关系可得 x 与 h 的关系式为

$$x^2 = 2rh - h^2 \tag{7}$$

式中 r ——镇压轮半径

由于下陷量的平方 h^2 远小于镇压轮的直径 $2r$, 故在计算时可忽略 h^2 。将式(7)简化并对其求导后代入式(6)可得

$$W_n = kb \int_0^{h_0} \frac{h^n \sqrt{r}}{\sqrt{2h}} dh \tag{8}$$

解得
$$W_n = 2 \sqrt{2rkb} \frac{h_0^{n+\frac{1}{2}}}{2n+1} \tag{9}$$

由式(9)可知土壤总抗压反作用力与土壤物理性质、镇压轮结构和土壤下陷量有关,且反作用力与土壤下陷量呈正相关。当镇压轮行进过程中与凸起的土包接触瞬间可视为镇压轮土壤下陷量增加,进而导致土壤对镇压轮反作用力增加,镇压轮对土壤表面的载荷增加,安装在轮轴处的镇压力传感器因而可以检测到地面信息变化。又由式(2)可知液压执行机构根据传感器信息对液压缸活塞杆伸长量进行控制,从而改变镇压轮竖直方向位置,使土壤下陷量得到调节,镇压力得到控制。

参照农艺要求,玉米种植过程中要求镇压作业对土壤产生的压强在 30 ~ 50 kPa 范围内为宜^[1]。由式(2)和式(9)可知镇压力的选取需考虑土壤特性、镇压轮结构,且实际工作中还需综合考虑地表残留情况、地形、播种机工作速度等多种因素,难以准确计算合适的镇压力取值范围。故参照文献[21]的方法,依据播种单体自身结构和参数确定本研究的播种单体可供液压缸装配长度小于等于 300 mm,需提供镇压力大于等于 500 N,将为选取液压油缸和镇压力传感器提供支撑。

2 电液控制系统设计

2.1 液压执行机构设计

2.1.1 液压回路设计

玉米播种单体通过快速接头连接拖拉机供油系统,液压回路如图 7 所示,主要包括电磁比例换向阀、液压缸、蓄能器、溢流阀以及其他辅助元件和管路。

当系统处于工作状态时,进油口 P 和出油口 T 分别接入拖拉机供油系统和油箱。当电磁比例换向阀左位接入油路时,液压缸活塞杆伸出;当电磁比例

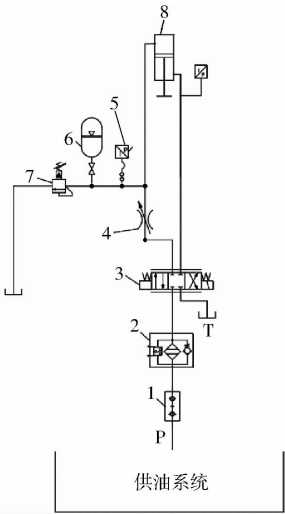


图 7 玉米播种单体液压回路

Fig. 7 Hydraulic circuit of corn planter unit

1. 快速接头 2. 过滤器 3. 电磁比例换向阀 4. 节流阀 5. 压力传感器 6. 蓄能器 7. 溢流阀 8. 液压缸

换向阀右位接入油路时,液压缸活塞杆收缩;换向阀 O 型中位接入油路时,液压缸闭锁。通过节流阀控制流量,通过溢流阀调节系统压力、保护回路,蓄能器具有降低系统波动、快速响应的功能。

2.1.2 主要液压元件选型

液压系统是用比例换向阀组成的液压油路控制油缸,通过比例换向阀实现镇压油缸随动调节,能够使镇压轮对田间地形变化及时作出反应,克服因地表起伏造成的振动问题,避免出现悬空或过度镇压等情况,始终与地面紧密贴合以保持镇压力恒定。查阅相关资料可知,常见国产拖拉机后液压输出流量一般为 38 L/min,额定工作压力 12 MPa^[25],考虑到液压系统通用性以及使用安全性,经计算液压回路工作油压 p_u 取 10 MPa,系统流量为 10 L/min。液压缸选型与所需工作压力有关,液压缸应在提供足够镇压力的前提下适配播种单体的改装预留空间。液压缸理论推力 F_u 计算公式为

$$F_u = \frac{\pi}{4} \eta_g [d_h^2 (p_u - p_0) + d_g^2 p_0] \tag{10}$$

- 式中 d_h ——活塞直径,mm
 d_g ——活塞杆直径,mm
 p_0 ——回油背压力,MPa
 η_g ——机械效率,取最小值 0.85

根据播种单体具体结构,代入相关参数对液压缸选型。查阅产品手册选择 MOB 系列液压缸,其活塞直径为 32 mm,液压缸活塞杆直径为 16 mm,活塞行程为 50 mm,考虑该液压系统为镇压轮提供压力时只有无杆端受力,故由式(10)可知,油缸最大推力 F_u 为 6 836 N,满足最大镇压力要求,主要元件型号及参数如表 1 所示。

表 1 液压系统主要元件及参数

Tab.1 Main components and parameters of hydraulic system

元件	型号	主要参数
液压缸	MOB-32X16X50CA + PHS	无杆腔内径 32 mm
		活塞杆直径 16 mm
		活塞行程 50 mm
		最大推力 6 836 N
隔膜式蓄能器	AD-A-0.75/210	公称容积 0.75 L
		允许工作压力 21 MPa
直控式电磁比例换向阀	MA-DH2O	最大工作压力 35 MPa
		最大流量 25 L/min
		最大阶跃响应时间 30 ms

2.2 控制系统设计

2.2.1 上位机操作界面设计

工作参数设定以及测量值实时显示通过控制面板实现,采用 NI LabVIEW 2016 软件进行设计,操作界面如图 8 所示。主要功能包括:模式切换、工作参数设定、镇压力实测值监测、液压缸工作状态监测等。

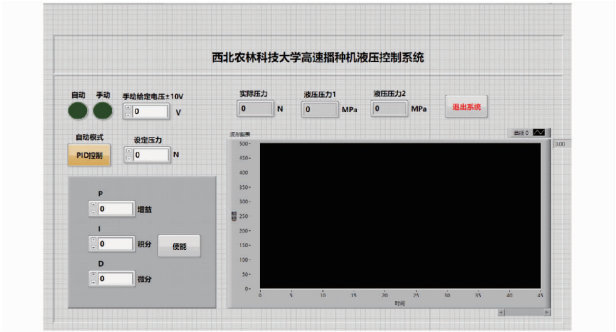


图 8 软件操作界面

Fig. 8 Operation interface of program

2.2.2 下位机 PID 控制程序设计

采用力闭环控制系统实现镇压力的实时调节,该系统用力传感器感受镇压力的变化并转换为电信号,反馈到控制器,构成闭环力控制系统。程序主要由主程序和镇压力控制子程序组成,主程序实现对子程序的调用,流程图如图 9 所示。为提高系统可操作性,方便调试和使用,编写了自动 PID 控制子程序和手动辅助子程序。手动模式通过人工输入给定电压对电磁换向阀直接控制,以便工作前后调整镇压轮的收放;自动 PID 控制模式需设定目标值和 PID 参数,工作时 PID 控制器根据给定参数完成对电磁阀的自动控制。

2.2.3 控制系统硬件选型

控制系统主要硬件包括电源、控制器、镇压力传感器等。轴销传感器常被用于检测播种单体下压力^[26],根据镇压轮尺寸和单体结构要求设计销轴传感器来检测镇压力,其长 125 mm、直径 12 mm、量程 1 000 N、材料为 40Cr。镇压力传感器机械强度通过

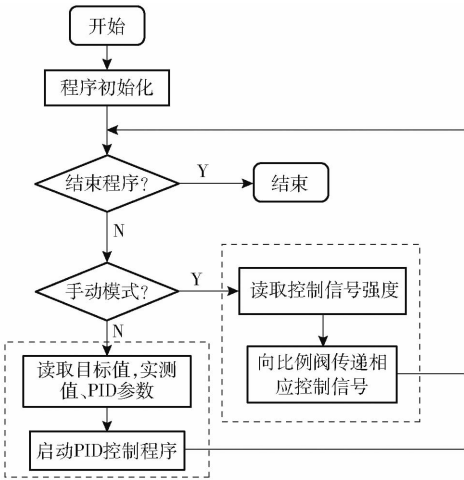


图 9 程序流程图

Fig. 9 Program flowchart

ANSYS 2024 软件进行仿真校核,如图 10 所示。模型安装方式为左右两端固定,对与轮轴接触部分施加等量程的 1 000 N 力载荷,划分 4 886 个四面体网格进行求解计算,结果如图 10 所示。仿真结果表明,模型受到的最大应力为 494.01 MPa,小于材料屈服应力 735 MPa,最小安全系数为 1.49,满足试验和工作要求,可投入制造。

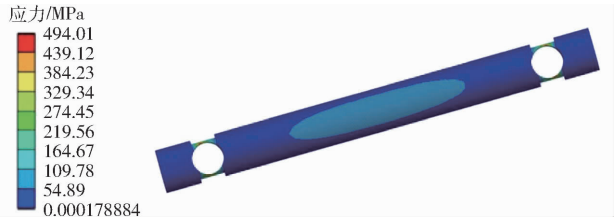


图 10 镇压力传感器应力分析图

Fig. 10 Stress analysis diagram of pressure sensor

控制系统采用尺寸 112 mm × 20 mm × 70 mm,质量为 0.3 kg 的锂电池组供电,携带轻便易安装。选取响应速度和可靠性均较高的西门子 S7-1200PLC 为控制器,其主要元件参数如表 2 所示。

表 2 主要硬件型号及工作参数

Tab.2 Main hardware and operating parameters

元件名称	型式/型号	工作参数
镇压力传感器	ZBS-V02	工作电压 17 ~ 24 V DC
		输出电压 0 ~ 10 V
		精度 0.1% F·S
		输出电流 4 ~ 20 mA
控制器	CPU 1212C	额定电压 17 ~ 24 V DC
电源	锂电池组	容量 3 000 mA·h
		可持续电流 5 A

3 电液控制系统试验

3.1 基于 AMESim 液压系统仿真试验

PID 控制在播深控制、割台仿形领域被广泛应

用^[27-30],为研究 PID 控制在本研究中的适用性,同时对液压系统设计进行初步优化,通过 AMESim 软件开展仿真试验。基于图 7 对液压系统建模,如图 11 所示。

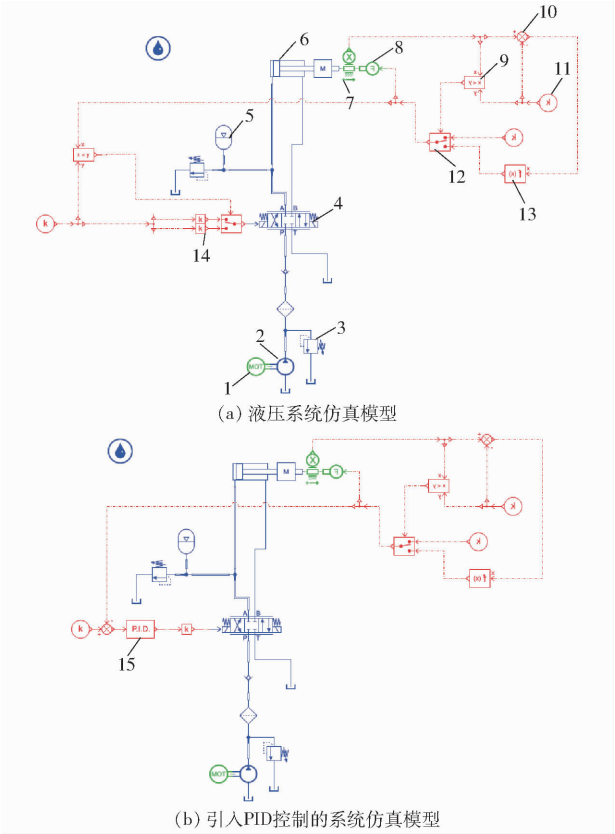


图 11 液压系统仿真模型

Fig. 11 Hydraulic system simulated test

1. 电机 2. 定量泵 3. 溢流阀 4. 电磁换向阀 5. 蓄能器
6. 液压缸 7. 位移传感器 8. 力信号转换器 9. 信号比较节点
10. 减法运算节点 11. 常数信号赋值节点 12. 信号开关 13. 函数定义节点 14. 增益赋值节点 15. PID 控制器

图 11a 中电机和定量泵模拟系统油源,溢流阀根据实际功能进行参数设置,电磁换向阀按实际所用型号进行参数设置,蓄能器根据实际需要设定参数,双作用单活塞杆带负载液压缸对液压缸进行模拟。镇压力检测部分包括位移传感器、力信号转换器、信号比较节点、减法运算节点、常数信号赋值节点、信号开关和函数定义节点,其原理是:位移传感器检测液压缸活塞杆位移,力信号转换器将信号转换为负载力,由信号比较节点进行比较。当活塞杆移动距离小于常数信号赋值节点的设定值 0.02 m 时,认为镇压力轮未接触地面,负载力由常数信号赋值节点设定为 0;当位移大于设定值时,位移值与常数信号赋值节点设定值的差值经减法运算节点计算后作为函数定义节点设定函数的自变量,计算得到负载力,负载力作用于液压缸的同时输入到组成元件相同的控制部分。信号比较节点将负载力与常数信

号赋值节点设定的目标值 400 N 进行比较,若负载力小于目标值,则常数信号赋值节点的信号传至增益赋值节点,赋值 -10 后经信号开关向电磁换向阀发出控制信号使其做出反应,使阀芯右位工作,系统进入加压状态;反之信号经由信号赋值节点赋值 0 后对电磁换向阀发出指令,使阀芯中位工作,系统进入保压状态。图 11b 中除去原有控制部分,引入 PID 控制器,元件主要参数设置如表 3 所示。

Tab.3 Component simulation parameter setting		
元件名称	参数	数值
电机	转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	1 000
定量泵	泵排量/($\text{L}\cdot\text{r}^{-1}$)	0.01
溢流阀	开阀压力/MPa	10
电磁换向阀	各端口最大流量/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	10
	各端口压降/MPa	1.3
	阀的额定电流/mA	10
蓄能器	端口 1 处压力/MPa	8
	气体预充压力/MPa	8
	公称容积/L	0.75
液压缸	活塞杆与水平方向的夹角/($^{\circ}$)	-36
	负载质量/kg	50
	泄漏系数/($\text{MPa}\cdot\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.001

活塞杆速度曲线如图 12 所示,从图 12a 中可知,活塞杆负载开始增加至设定目标值用时 0.22 s,系统调节速度较快。但系统此时仍不稳定,活塞杆至 10 s 仿真结束时仍存在速度波动,系统调节精度和稳定性较差。从图 12b 中可知,引入 PID 控制后当调至合适参数时在不影响调节速度的前提下系统运行较为平稳,未出现波动,至 0.63 s 时停止运动保持稳定。

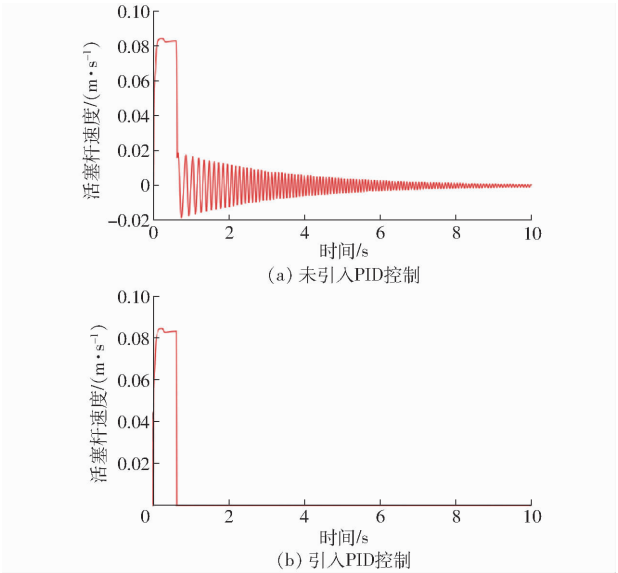


图 12 活塞杆速度曲线

Fig. 12 Graphs of rod velocity

仿真结果表明:液压系统能够较为快速地实现镇压力调节,但存在系统调节精度较低、稳定性不足的问题,在控制系统设计中引入 PID 控制可提高系统调节精度和稳定性。

本试验中,当 PID 参数调至 0.4、0.5、0 时,系统运行效果最好。由于本研究设计的镇压力电液控制系统是非线性系统,且实际作业中镇压力负载更加复杂。因此需要在试验台架上进一步验证和调试 PID 控制参数。借鉴工业上常用的试验试凑法,并参考软件仿真结果缩小试凑范围以获取最优 PID 参数组合。

3.2 PID 控制系统阶跃响应试验

系统阶跃响应试验于 2024 年 5 月 2 日在西北农林科技大学机械与工程学院液压传动实验室开展,采用 QCS036 型插接式液压综合试验台进行调试,试验台与调试过程如图 13 所示。经调试后得出最优参数组为 0.4、0.8、0,并开展阶跃响应试验。

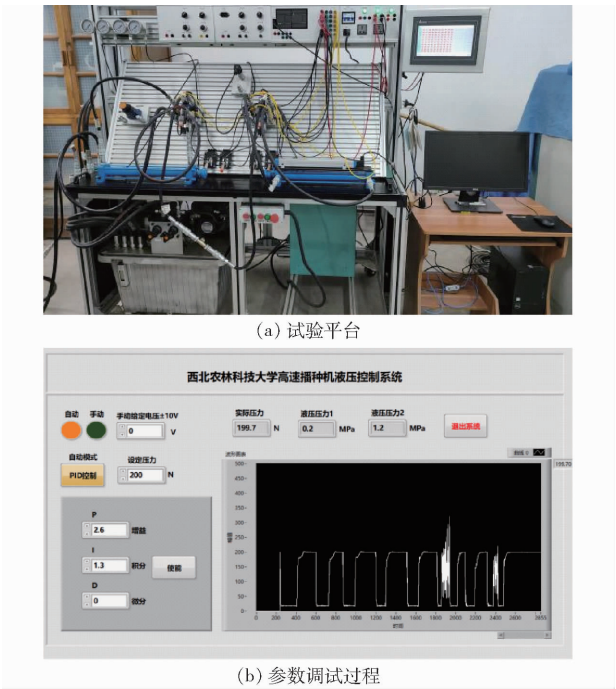


图 13 PID 控制参数调试

Fig. 13 PID control parameter debugging

设定镇压力传感器目标值为 400、300、200 N,响应曲线如图 14 所示。由图 14 可知,在 PID 控制模式下,设定目标值为 400 N 时,调节时间为 2.2 s、超调量为 3.1%、稳态误差最大为 1.8 N;设定目标值为 300 N 时,调节时间为 1.3 s、超调量为 0.8%、稳态误差最大为 2.2 N;设定目标值为 200 N 时,调节时间为 1.6 s、超调量为 2.1%、稳态误差最大为 1.7 N;调节时间均值为 1.9 s、超调量均值为 2.0%、稳态误差均值 1.9 N。调节时间均值和超调量均值

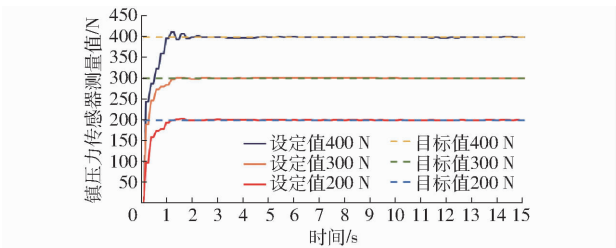


图 14 镇压力控制系统阶跃响应曲线

Fig. 14 Step response curves of compaction pressure control system

与现有研究的 1.44 s 和 1.83% 接近,但稳态误差均值远小于文献[7]中的 30 N,该电液控制系统可以满足镇压力控制的精度和速度要求。

3.3 土槽验证试验

3.3.1 试验条件和试验装置

为验证基于电液控制的玉米播种单体镇压系统的准确性和稳定性,于 2024 年 6 月 3 日在西北农林科技大学农机实验室进行土槽验证试验。试验土槽长 20 m,宽 2 m,试验装置和仪器如图 15 所示,主要包括自制的镇压力主动调控玉米播种单体及其搭载平台、TCC-2.1 型土槽试验车、SC900 型土壤坚实度测试仪、TZS-8K-G 土壤含水率监测系统、MT202 型电子秤、YL90-4 型电机、VP-20 型叶片泵。



图 15 台架试验装置

Fig. 15 Bench test device

1. 电液控制系统 2. 播种单体 3. 搭载平台 4. 土槽试验车

3.3.2 土壤制备与作业参数标定

土槽试验前需对土壤进行制备,常采用补水、旋耕和压实处理。参考相关研究和实际田间测量结果,得到耕作层(0~10 cm)土壤平均坚实度为 250~2 080 kPa^[31],土壤含水率为 13.5%~18.0%^[32],土壤容重为 1.05~1.53 g/cm³^[33]。避开播种单体行进路线间隔 0.5 m 取 20 个采样点,分别采用土壤坚实度测试仪、土壤含水率监测系统和土壤环刀对处理后土壤参数进行检测,测得土壤坚实度为 257.81~291.54 kPa,均值为 275.27 kPa;含水率为 22.5%~27.1%,均值为 25.7%;采用环刀法测量土壤容重为 1.06~1.31 g/cm³,均值为 1.18 g/cm³。3 组数据上下偏差均较小且土壤坚实度和土壤容重数值均在文献[31,33]提供的标准范围内。考虑到试验准备过程中的损耗,制备土壤时土壤含水率应略高于标准

值,认为此时土壤均匀且土壤参数均满足验证试验要求,可以开展后续工作,待含水率降至标准范围内进行试验。

为更好地检验镇压力电液控制系统的准确性与灵敏性且保证多次试验条件的一致性,本研究参考汤庆等^[10]的试验方法,结合实际情况利用处理后的土壤构筑如图 16 所示正弦曲线地表,曲线方程为

$$H=A\sin(2\pi v_c t)$$

(11)

式中 v_c ——土槽试验车前进速度,m/s
 t ——土槽试验车的行驶时间,s
 H ——正弦曲线地表竖直方向上位移,mm
 A ——正弦曲线地表竖直方向上最大位移,mm

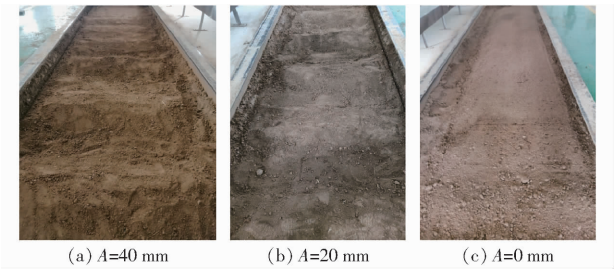


图 16 构筑的试验路面

Fig. 16 Test pavement construction

结合试验场土壤物理性质和前期预试验经验, A 分别取 0、20、40 mm。经计算,波形路面周期取整设置为 1 m。

镇压力控制系统以镇压力传感器发送的电信号为依据,控制比例换向阀从而调节镇压力,在正式试验前需调整卡槽和紧固螺栓使镇压力传感器转至合适角度,使传感器示数与真实值接近。为减小试验误差,需对传感器检测的镇压力进行标定。将播种单体调至工作位置,通过电子秤测量实际下压力,对镇压力传感器测量值进行验证,标定结果如图 17 所示。

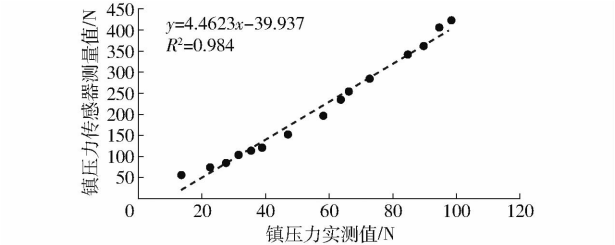


图 17 镇压力传感器标定结果

Fig. 17 Pressure sensor calibration results

镇压力标定试验结果表明:通过镇压力传感器测量的数据与实际下压力具有较好的线性关系(决定系数为 0.984),该回归方程将用于计算镇压力的实测值。

3.3.3 测试项目与方法

考虑到土槽试验的安全性,且已在制备土壤时

采用正弦曲线地表,土槽试验作业速度定为 4 km/h,土槽前后各留 5 m 作为加减速区,中间 10 m 作为稳定区。每次制备土壤平均分为 3 块相同区域用于重复试验。进行预试验,根据反馈结果适当限制控制器输出以进一步提高传感器检测数据的稳定性。根据 NY/T 2851—2015《玉米机械化深松施肥播种作业技术规范》^[34]将播深设定为 30 mm,镇压力目标值分别设定为 200、300、400 N,并与播种机原装机械式镇压调节机构进行对比试验,每组试验重复 3 次,并记录作业中的实时镇压力,试验过程以及耕作后路面如图 18 所示。



图 18 台架试验过程

Fig. 18 Bench test process

为进一步分析不同调节方式对土壤镇压效果的影响,作业后采用土壤坚实度测试仪检测土壤坚实度,在土槽内选取 10 m 稳定作业区域,根据仪器分辨率(2.5 cm)和波形周期选择间隔 0.5 m 记录镇压后相对深度 30 mm 处的土壤坚实度。

3.3.4 结果与分析

从上位机软件中导出稳定区镇压力传感器测量数据,分别绘制不同正弦曲线地表条件下镇压力随时间变化曲线,如图 19 所示,计算均方根误差衡量实测值与目标值之间的偏差。试验采用的镇压力调节方式包括采用目标镇压力为 200、300、400 N 的自动 PID 控制和目标镇压力约为 300 N 的机械调节方式 2 种。

图 19a 为当 A 取 40 mm 时,采用自动 PID 控制和机械调节镇压力时与目标镇压力对比结果。从图 19a 可看出,采用不同调节方式,镇压力曲线均随地形呈现明显的波动状态。采用自动 PID 控制,目标值增至 300 N 时,镇压力波动较 200 N 时有明显增大,当目标镇压力分别为 200、300、400 N 时,均方根误差为 59.5、98.7、83.7 N。采用目标镇压力为 300 N 的机械调节方式,均方根误差为 184.3 N,自动 PID 控制较机械调节降低 46.4%。

图 19b 为当 A 取 20 mm 时,采用自动 PID 控制和机械调节镇压力时与目标镇压力的对比结果。从图中可以看出采用不同调节方式,镇压力曲线仍能随地形呈现明显的波动状态。采用自动 PID 控制,镇压力波动相对较小,当目标镇压力分别为 200、

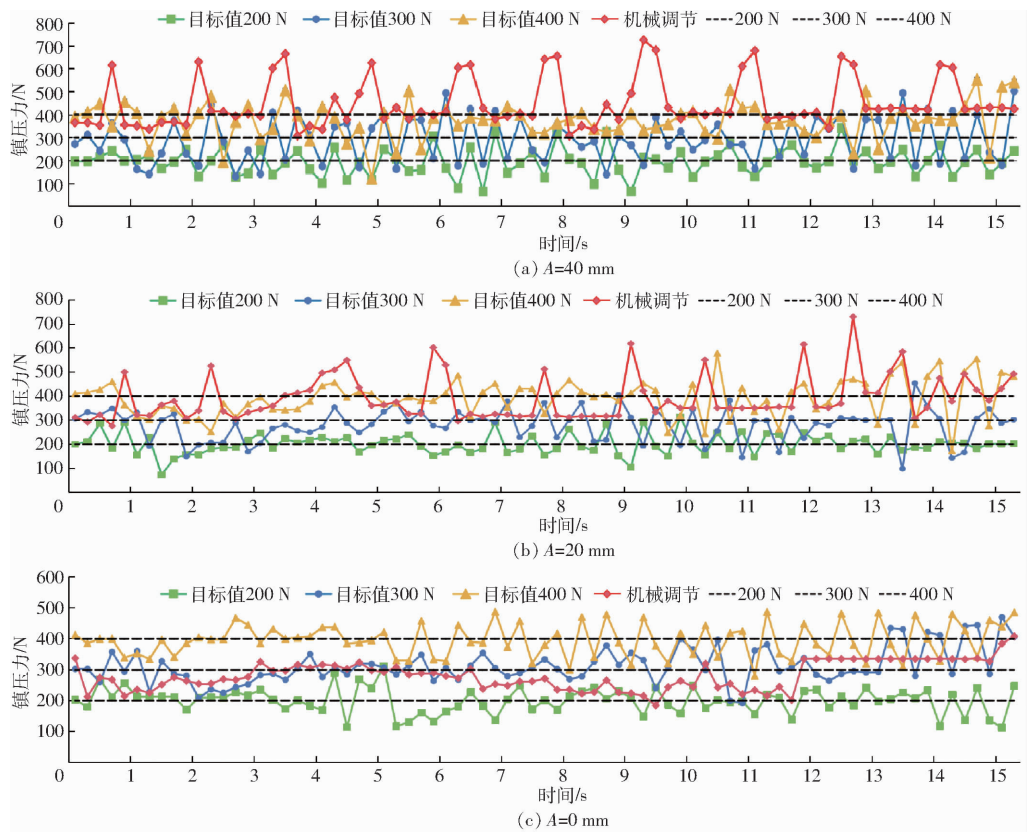


图 19 台架验证试验结果
Fig. 19 Bench verification test results

300、400 N 时,均方根误差为 42.9、70.6、78.6 N。采用目标镇压力为 300 N 的机械调节方式,均方根误差为 131.7 N,自动 PID 控制较机械调节降低 61.1%。

图 19c 为当 A 取 0 mm 时,采用自动 PID 控制和机械调节镇压力时与目标镇压力的对比结果。从图中可以看出采用自动 PID 控制时,镇压力曲线均随地形呈现明显的波动状态,机械调节方式波动较小,但始终与 200、400 N 的目标值有较大差距。当目标镇压力分别为 200、300、400 N 时,均方根误差为 41.3、59.7、53.2 N。采用目标镇压力为 300 N 的机械调节方式,均方根误差为 49.5 N,均方根误差降低 17.1%,略优于自动 PID 控制,可能是在 PID 控制环节因为积分系数较大导致系统响应过度,引起小幅振荡,可通过适当降低积分系数或提高微分系数解决。

当 A 分别为 0、20、40 mm 时,随着目标镇压力增加,自动 PID 控制下镇压力均方根误差变化不显著,最大差值为 39.2 N,说明控制系统性能受目标值变化影响较小,可适应多种作业要求。

当自动 PID 控制和机械调节的目标均设定在 300 N 时,对比不同路面条件下 2 种调节方式。机械调节在平整路面镇压力稳定性略优于自动调节,均方根误差降低 10.2 N,随着路面起伏增大机械调

节的稳定性显著低于自动 PID 控制调节,在竖直方向上的最大位移为 40、20 mm 时均方根误差分别低 85.6、61.6 N。总体而言采用自动 PID 控制方式时镇压力均方根误差平均低 30.1%,自动 PID 控制对镇压力的调节效果更为稳定。

上述结果表明:自动 PID 控制的镇压力在目标值处小范围浮动,存在少数镇压力偏差较大,调节不及时现象;机械调节方式下的镇压力普遍存在偏差较大、调节范围有限、镇压力变化特征受地形因素影响较大的特点。综上所述,自动 PID 控制方式对复杂工作环境的适应能力更强,但仍需根据台架试验结果对 PID 参数进一步调整使控制系统的性能得以充分发挥。

对测得土壤坚实度数据进行处理,并计算均值和变异系数,结果如表 4 所示。从表 4 可看出,各组种沟坚实度均值均低于制备土壤时测得土壤坚实度,这是因为播种单体配备的开沟器在土壤表面开出种沟使土壤疏松,而镇压轮的作用则是使种沟上方土壤不过于疏松。

在自动 PID 控制方式下目标值为 300、400 N 的试验组种沟坚实度均值重新回到 211.55 ~ 254.82 kPa 范围内,而目标值 200 N 的试验组和机械调节的对照组种沟坚实度均值则在 133.91 ~ 197.81 kPa 范围内,镇压效果相对较差。此外,机械

表 4 坚实度检测结果
Tab.4 Soil compaction test result

调节方式	正弦路面 幅值/mm	种沟坚实 度均值/ kPa	种沟坚实 度标准 差/kPa	种沟坚实 度变异系 数/%
目标值 200 N	0	166.18	20.79	12.51
	20	184.91	51.84	28.03
	40	197.81	51.74	26.16
目标值 300 N	0	211.55	21.51	10.17
	20	241.64	22.49	9.31
	40	254.82	24.31	9.89
目标值 400 N	0	220.18	42.92	19.49
	20	252.27	40.85	16.19
	40	249.09	79.34	26.16
机械调节	0	158.80	40.83	25.71
	20	151.62	54.56	35.99
	40	133.91	54.96	41.05

调节方式下的种沟坚实度普遍低于自动 PID 设置下的 3 种方式,但由图 19 可知,在 20、40 mm 位移下,机械式的镇压力普遍大于 3 种设定压力,镇压力大而坚实度低。本研究认为这种现象是机械式镇压力调节机构作用不及时、作用效果差与土壤滑移共同造成的。机械调节下的镇压轮因不能及时调节镇压力,在遇到位移为 20、40 mm 的地表凸起时镇压轮受到较大阻力,此时镇压轮给予地表巨大的反作用力将土壤推向周围,使地表形状被破坏,凸起消失。随后该处两侧较高位置松软的土壤受重力影响回填覆盖在上层。由于土壤坚实度的取值深度较浅(参考农艺要求),土壤坚实度测试仪的探针受到回填土壤的干扰导致示数整体偏小。由于该现象不是试验中特有的,在实际工作中镇压轮遭遇地面凸起时依然会有这种现象产生,故虽土壤坚实度整体偏小但认为土壤坚实度变异系数仍具有分析价值。

分析标准差和变异系数可知,随着路面起伏增加种沟坚实度的标准差普遍有所增加,其中目标值为 300 N 时标准差和变异系数均最小,说明该工作环境下目标值 300 N 的电液调节方式镇压效果最好,目标值为 200 N 时镇压力较小不能充分镇压,目标值为 400 N 时可能出现调节不及时、过度调节的现象,导致镇压不均匀。机械调节方式种沟坚实度变异系数普遍较高,最大为 41.05%,说明机械调节方式在应对复杂路面情况时镇压效果相对电液调节

方式较差,与对镇压力实测值的分析结果相同。当自动 PID 控制和机械调节的目标均设定在 300 N 左右时,对比不同路面条件下 2 种调节方式。自动 PID 控制在 3 种路面下的种沟坚实度变异系数均优于机械调节,平均低 24.46 个百分点,说明因积分系数设定不当导致的镇压力波动不足以对土壤镇压效果造成较大影响。本性能验证试验在土槽内构筑正弦路面,地形起伏较高,采用机械调节方式的播种单体镇压力不足,一方面无法使种沟上方土壤得到充分镇压,另一方面作业过程中机器振动较大,导致镇压效果不均匀。然而,自动 PID 控制方式可以根据土壤情况调节镇压力,保证合适的压实度。试验中,自动 PID 控制方式下的种沟坚实度变异系数均值为 17.55%,机械调节方式下的种沟坚实度变异系数均值为 34.25%。基于自动 PID 控制方式的播种机单体镇压设备试验指标优于基于机械调节方式的指标。

4 结论

(1)提出镇压力主动调控技术方案,设计了基于电液控制的玉米播种单体镇压系统,通过单体运动分析和镇压部件与土壤相互作用力学分析确定镇压力控制过程。通过计算机仿真分析和阶跃响应试验对液压执行机构和电控系统进行设计优化。

(2)阶跃响应测试结果表明:系统调节时间均值为 1.9 s、超调量均值为 2.0%、稳态误差均值为 1.9 N,与现有研究成果相比,镇压力控制系统的理论工作性能满足作业需求。土槽验证试验结果表明:在相同作业参数下,相较传统的机械调节方式,采用自动 PID 控制方式时镇压力均方根误差最大差值为 39.2 N,镇压力均方根误差平均低 30.1%,种沟坚实度变异系数平均低 24.46 个百分点。镇压力控制系统对复杂工作环境有较强的适应性,可对种沟上方土壤施加持续均匀的镇压力。同时 PID 参数的选取需综合分析计算机模拟试验和实际验证试验的结果,以获取最优参数组合。

(3)在旱作免耕及高速作业条件下,电液主动调节方式可以为播种单体提供适当的镇压力,能保持较好的镇压均匀性,整体性能优于机械调节方式,为旱区播种作业过程中湿润种床构建以及玉米精密播种提供技术和装备支撑。

参 考 文 献

[1] 郭慧. 行间耕播机弹性镇压装置研究与试验[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
GUO Hui. Research and experiment of elastic press device for inter-row till-planter[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)

[2] 姜业成, 孙海全, 邓奥严, 等. 苗带重镇压对土壤环境玉米生长及产量的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(6):118 – 123.
JIANG Yecheng, SUN Haiquan, DENG Aoyan, et al. Influence of seedling belt heavy repression technology on maize yield and

comprehensive index[J]. Journal of Maize Science, 2022, 30(6):118 – 123. (in Chinese)

[3] ALTIKAT S, CELIK A. The effects of tillage and intra-row compaction on seedbed properties and red lentil emergence under dry land conditions[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 114(1):1 – 8.

[4] 苑严伟, 白慧娟, 方宪法, 等. 玉米播种与测控技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9):1 – 18.
YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9):1 – 18. (in Chinese)

[5] 耿元乐. 中小型玉米免耕播种机镇压部件设计与镇压力控制研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.
GENG Yuanle. Research on the design of press devices and control of compaction pressure for small and medium-sized corn no-till planter[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023. (in Chinese)

[6] 姚颖飞, 陈学庚, 纪超, 等. 基于模糊 PID 控制的玉米精量播种机单体驱动器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6):12 – 21.
YAO Yingfei, CHEN Xuegeng, JI Chao, et al. Design and experiments of the single driver for maize precision seeders based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6):12 – 21. (in Chinese)

[7] 白慧娟, 方宪法, 王德成, 等. 玉米播种机播深和压实度综合控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9):61 – 72.
BAI Huijuan, FANG Xianfa, WANG Decheng, et al. Design and test of control system for seeding depth and compaction of corn precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9):61 – 72. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 姜鑫铭. 玉米免耕播种机精确播种关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
JIANG Xinming. Study on key technologies of precision seeding for maize no-tillage planter[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)

[10] 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)

[11] 蔡国华, 李慧, 李洪文, 等. 基于 ATmega128 单片机的开沟深度自控系统试验台的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10):11 – 16.
CAI Guohua, LI Hui, LI Hongwen, et al. Design of test-bed for automatic depth of furrow opening control system based on ATmega128 single chip microcomputer[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10):11 – 16. (in Chinese)

[12] WEN Liping, FAN Xiongfei, LIU Zhao, et al. The design and development of the precision planter sowing depth control system[J]. Sensors & Transducers, 2014, 162(1):53 – 58.

[13] JIA Honglei, GUO Mingzhao, YU Haibo, et al. An adaptable tillage depth monitoring system for tillage machine[J]. Biosystems Engineering, 2016, 151:187 – 199.

[14] LINDEN S V, 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.

[15] SØREN K N, LARS J M, MATHIEU L, et al. Seed drill instrumentation for spatial coulter depth measurements[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 141:207 – 214.

[16] SØREN K N, LARS J M, MATHIEU L, et al. Seed drill depth control system for precision seeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 144:174 – 180.

[17] SØREN K N, LARS J M, MATHIEU L, et al. Sensor and control for consistent seed drill coulter depth[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127:690 – 698.

[18] 王淞, 衣淑娟, 赵斌, 等. 基于 IWHO – EKF 的高速免耕播种机播种深度监测系统研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3):75 – 84.
WANG Song, YI Shujuan, ZHAO Bin, et al. High-speed no-till seeder seeding depth monitoring system based on IWHO – EKF[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3):75 – 84. (in Chinese)

[19] 黄东岩, 朱龙图, 贾洪雷, 等. 基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4):1 – 8.
HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):1 – 8. (in Chinese)

[20] 贾洪雷, 郭慧, 郭明卓, 等. 行间耕播机弹性可覆土镇压轮性能有限元仿真分析及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21):9 – 16.
JIA Honglei, GUO Hui, GUO Mingzhao, et al. Finite element analysis of performance on elastic press wheel of row sowing plow machine for covering with soil and its experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21):9 – 16. (in Chinese)

[21] 高原源, 王秀, 杨硕, 等. 播种机气动式下压力控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7):19 – 29.
GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Design and test of pneumatic downforce control system for planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7):19 – 29. (in Chinese)

[22] 高原源, 王秀, 杨硕, 等. 基于 CAN 总线的播种深度监测评价系统研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12):23 – 32.
GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Development of CAN based sowing depth monitoring and evaluation system

- [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 23–32. (in Chinese)
- [23] PASI P S, TIMO O. Automatic working depth control for seed drill using ISO 11783 remote control messages[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 116: 30–35.
- [24] 刘宏俊. 东北丘陵地区播种机镇压装置关键技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
LIU Hongjun. Research on key technologies of press device for planter in hilly region of northeast China[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019. (in Chinese)
- [25] 付卫强, 董建军, 梅鹤波, 等. 玉米播种单体下压力控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 68–77.
FU Weiqiang, DONG Jianjun, MEI Hebo, et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 68–77. (in Chinese)
- [26] 高原源, 翟长远, 杨硕, 等. 精密播种机下压力和播深 CAN 总线监控与评价系统研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 15–28.
GAO Yuanyuan, ZHAI Changyuan, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based downforce and sowing depth monitoring and evaluation system for precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 15–28. (in Chinese)
- [27] 薛冰, 周利明, 牛康, 等. 基于自适应模糊 PID 的小麦播深控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊1): 93–102.
XUE Bing, ZHOU Liming, NIU Kang, et al. Sowing depth control system of wheat planter based on adaptive fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Suppl. 1): 93–102. (in Chinese)
- [28] 王志超, 杨然兵, 陈栋泉, 等. 基于 PID 调控的割台仿形高度控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2024, 46(2): 97–102.
WANG Zhichao, YANG Ranbing, CHEN Dongquan, et al. Design of header profiling height control system based on PID regulation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(2): 97–102. (in Chinese)
- [29] 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)
- [30] 宫元娟, 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)
- [31] 石磊, 王娟铃, 许明祥, 等. 陕西省农田土壤紧实度空间变异及其影响因素[J]. 西北农业学报, 2016, 25(5): 770–778.
SHI Lei, WANG Juanling, XU Mingxiang, et al. Spatial variability and influence factors of cropland soil compaction in Shaanxi Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2016, 25(5): 770–778. (in Chinese)
- [32] 左爱华. 玉米沟播机械化作业技术规程[J]. 农业科技与装备, 2022(2): 8–9.
ZUO Aihua. Technical regulations for mechanized operation of corn furrow sowing[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2022(2): 8–9. (in Chinese)
- [33] 李毅, 梁嘉平, 王小芳, 等. 改善土壤理化性质和作物出苗率的最佳生物质炭施用量[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 64–76.
LI Yi, LIANG Jiaping, WANG Xiaofang, et al. The most appropriate biochar application rate for improving soil physicochemical properties and crop germination rates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(1): 64–76. (in Chinese)
- [34] 中华人民共和国农业部. NY/T 2851—2015 玉米机械化深松施肥播种作业技术规范[S]. 北京: 中国农业出版社, 2015.

(上接第 261 页)

- [28] 车建壮, 于磊, 李其昀. 双圆盘式小麦免耕播种机设计与试验研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2011, 25(6): 25–28.
CHE Jianzhuang, YU Lei, LI Qiyun. Design and study on the double-disk no-till planter for wheat[J]. Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition), 2011, 25(6): 25–28. (in Chinese)
- [29] 闻邦椿. 机械设计手册(第3卷): 机械零部件设计[M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [30] 祝清震, 武广伟, 陈立平, 等. 槽轮结构参数对直槽轮式排肥器排肥性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 12–20.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Influences of structure parameters of straight flute wheel on fertilizing performance of fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 12–20. (in Chinese)
- [31] 张季琴, 刘刚, 胡号, 等. 排肥单体独立控制的双变量施肥控制系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 38–45.
ZHANG Jiqin, LIU Gang, HU Hao, et al. Development of bivariate fertilizer control system via independent control of fertilizing unit[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(10): 38–45. (in Chinese)