doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.006

玉米免耕播种机镇压力精准调控系统设计与试验

安晓飞[1,2]　周雨来[1,2]　李立伟[2]　秦维贤[2]　孟志军[2]　尹彦鑫[2]　丛　岳[2]
(1.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830052;2.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097)

摘要:针对玉米免耕播种机播种镇压力稳定性差和镇压强度不均等问题,设计了一种基于 PID 控制的镇压力精准调控系统。该系统由镇压力检测单元、液压调节装置、控制器、终端和机械执行部件组成。基于拉力传感器、角度传感器测量数据,采用 Origin 软件构建镇压力与两传感器测量数据之间的关系模型。系统通过镇压力进行闭环反馈,应用 PID 控制算法计算控制变量,实时调节液压缸伸缩,实现对镇压力的精确控制。系统阶跃响应测试结果表明,镇压力精准调控系统调节时间均值为 1.13 s,稳态误差均值为 2.7 N,超调量均值为 3.23%。田间试验结果表明,当设定目标镇压力为 159、182 N、播种机作业速度为 5 ~ 9 km/h 时,基于液控调节方式下镇压力相对误差为 3.08% ~ 5.38%,均方根误差为 6.63 ~ 10.09 N,机械调节方式下镇压力相对误差为 5.05% ~ 11.48%,均方根误差为 11.67 ~ 22.49 N。基于液控调节方式的播种机试验指标显著优于基于机械调节方式的指标,提高了镇压力稳定性,为保障玉米免耕播种质量提供了技术装备支撑。

关键词:玉米免耕播种机;镇压力;调控系统
中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)04-0072-09　　**OSID**:

Design and Experiment of Precision Control System for Compaction Pressure Force of Corn No-tillage Planter

AN Xiaofei[1,2]　ZHOU Yulai[1,2]　LI Liwei[2]　QIN Weixian[2]　MENG Zhijun[2]　YIN Yanxin[2]　CONG Yue[2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Intelligent Equipment Research Center*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: In response to the practical issues of compaction pressure poor stability and uneven compaction strength in corn no-till seeder, a precise control system for compaction pressure was developed based on PID control. The system consisted of a compaction pressure detection unit, hydraulic regulation device, controller, terminal, and mechanical actuator. By utilizing measurement data from tension sensor and angle sensor, the relationship model between the compaction pressure and the measurement data of the two sensors was established by Origin software. The system employed the PID control algorithm to calculate control variables and adjust hydraulic cylinder extension and retraction in real-time, thereby achieving precise control of compaction pressure. Step response experiments revealed that the system's mean adjustment time was 1.13 s, with the mean steady-state error of 2.7 N and the mean overshoot of 3.23%. Field experiments demonstrated that the relative error of compaction pressure under hydraulic control mode was 3.08% to 5.38%, with root mean square error of 6.63 N to 10.09 N, when the target compaction pressures were set at 159 N and 182 N, and the seeder's operating speed ranged from 5 km/h to 9 km/h. In contrast, the relative error of compaction pressure under mechanical adjustment was from 5.05% to 11.48%, and the root mean square error was from 11.67 N to 22.49 N. The performance metrics of the seeder based on hydraulic control significantly outperformed those based on mechanical control, enhancing the stability of compaction pressure and providing technical and equipment to ensure the quality of no-till sowing of corn.

Key words: corn no-till planter; compaction pressure; regulatory system

收稿日期:2024-12-30　修回日期:2025-02-18
基金项目:新一代人工智能国家科技重大专项(2022ZD0115800)和国家现代农业产业技术体系项目(CARS-03)
作者简介:安晓飞(1986—),男,正高级工程师,博士,主要从事农机智能装备技术研究,E-mail:anxf@nercita.org.cn
通信作者:李立伟(1987—),男,高级工程师,主要从事农机智能装备技术研究,E-mail:lilw@nercita.org.cn

0　引言

播种同时进行镇压是农业生产中的一项重要技术措施，对优化种子生长环境具有重要影响[1-5]。通过镇压可提高土壤坚实度，增强土壤毛细管作用，提升土壤提墒、保墒和供墒能力，有助于土壤吸收地下水分，促使种子与土壤紧密接触，促进种子发芽和生长。当镇压强度较低，无法达到提墒效果；镇压过重，易造成板结而影响出苗。镇压强度是单位面积上承受的镇压力，通过对镇压力精准调节，可有效确保镇压强度均匀性，进一步提高玉米播种质量[6-13]。

目前，玉米免耕播种机镇压力控制多采用手动挡位调节方式，通过调整弹簧伸缩来调整镇压力，对镇压装置研究主要聚焦于镇压装置结构设计和抗粘附效果[14-24]。在实际作业时，由于地表凹凸不平，镇压轮绕铰接点转动，导致镇压力波动，难以保持稳定。目前对镇压装置研究主要集中在结构和功能优化，在镇压力精准调控研究方面，基于拉力传感数据调节研究较多，考虑机架-铰接点角度变化影响的较少[25-31]。机架-铰接点角度变化能够反映弹簧拉力角度变化，而镇压力与弹簧拉力在竖直方向上的分量直接相关，该分量受弹簧拉力和弹簧角度的共同影响。本文综合考虑机架-铰接点角度变化，设计一种适用于玉米免耕播种机的镇压力精准调控系统，并开展试验验证，以实现实时调控镇压力，保持镇压力稳定性。

1　镇压机构

1.1　镇压机构设计

基于现代农装科技股份有限公司生产的 2BQX-6 型玉米免耕精密播种机开展镇压力精准调控研究。镇压力精准调控系统由镇压力检测单元（拉力传感器和角度传感器）、液压调节装置、控制器、终端和机械执行部件组成。角度传感器安装在镇压轮架与播种机架铰接处，拉力传感器选用 S 型拉力式力传感器，一端与播种机架连接，一端与弹簧挂接。弹簧另一端与弹簧调节拉杆连接。镇压液压缸安装在播种机架和弹簧调节拉杆之间。系统工作时，控制器实时采集拉力与角度传感器数据，通过构建关系模型得到镇压力，利用获取的镇压力进行闭环反馈，控制液压缸伸缩，调整弹簧拉杆位置，带动弹簧伸缩，对镇压力进行控制，保证镇压强度稳定性。镇压机构示意图如图 1 所示。

1.2　镇压过程受力分析

在实际作业中，由于地表凹凸不平，镇压轮会绕着铰接点转动，带动弹簧伸缩，导致镇压力无法实时根据地形变化进行调控，使土壤压实度不均，影响免耕播种机镇压效果。本文考虑作业过程中镇压轮起伏角度与弹簧拉力变化对镇压力的影响，通过液压缸自适应调节弹簧伸缩，使弹簧力可以实时调整。

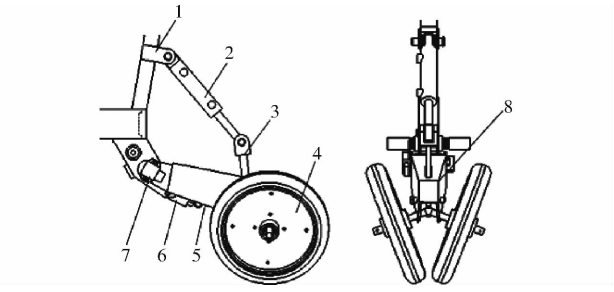


图 1　镇压机构结构示意图

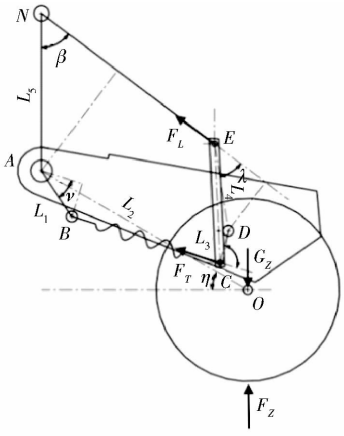
Fig. 1　Suppression device structure diagram

1. 机架　2. 液压缸　3. 弹簧调节拉杆　4. 镇压轮　5. 弹簧　6. 拉力传感器　7. 角度传感器　8. 镇压轮架

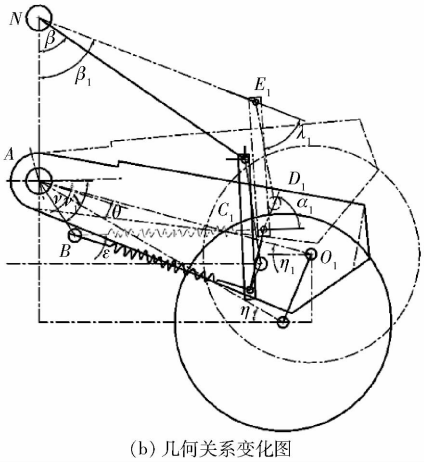
为了明确弹簧力、镇压轮角度与镇压力之间的关系，对镇压机构进行受力分析，分析当镇压单体转动时镇压轮角度变化对受力的影响。图 2 为镇压机构受力分析图。由图 2a 可得

$$M_A(F) = (F_Z - G_Z)L_2\cos\eta + F_L L_5\sin\beta - F_T L_1\sin\upsilon \quad (1)$$

$$M_C(F) = F_L L_4\sin\lambda - F_T L_3\sin\alpha \quad (2)$$



(a) 受力分析图



(b) 几何关系变化图

图 2　镇压机构整体受力分析

Fig. 2　Force diagrams of suppression device

当 $M_A(F)=0$,$M_C(F)=0$ 时,力矩平衡,此时由式(1)、(2)可得

$$F_Z=\frac{L_1\sin\upsilon}{L_2\cos\eta}F_T+G_Z-\frac{L_3L_5\sin\beta\sin\alpha}{L_2L_4\sin\lambda\cos\eta}F_T \tag{3}$$

式中 $M_A(F)$——合力对点 A 转矩,N·m

$M_C(F)$——合力对点 C 转矩,N·m

G_Z——镇压机构重力,N

F_Z——镇压力反作用力,N

F_T——弹簧力,即拉力传感器测量值,N

F_L——液压油缸在弹簧拉杆上的作用力,N

L_1——点 A 到弹簧端点 B 距离,m

L_2——点 A 与镇压轮轴心距离,m

L_3——点 D 到弹簧拉杆点 C 距离,m

L_4——点 E 到弹簧拉杆点 C 距离,m

L_5——油缸端点 N 与点 A 距离,m

α——CD 连接线与 F_T 延长线夹角,(°)

β——F_L 与 AN 连接线夹角,(°)

λ——F_L 与 CE 连接线延长线夹角,(°)

υ——过点 A 平行弹簧中心线与 AB 连接线夹角,(°)

η——AO 与水平面夹角,(°)

当镇压机构角度变化后,结合图 2b 可得

$$F_Z=\frac{L_1\sin(\upsilon+\varepsilon)}{L_2\cos(\eta-\theta)}F_T+G_Z-\frac{L_3L_5\sin\beta_1\sin\alpha_1}{L_2L_4\sin\lambda_1\cos(\eta-\theta)}F_T \tag{4}$$

式中 α_1——镇压轮绕播种单体转动后,CD 连接线与 F_T 延长线夹角,(°)

β_1——镇压轮绕播种单体转动后,F_L 与 AN 连接线夹角,(°)

λ_1——镇压轮绕播种单体转动后,F_L 与 CE 连接线延长线夹角,(°)

θ——镇压轮绕播种单体转动后,镇压机构角度变化量,(°)

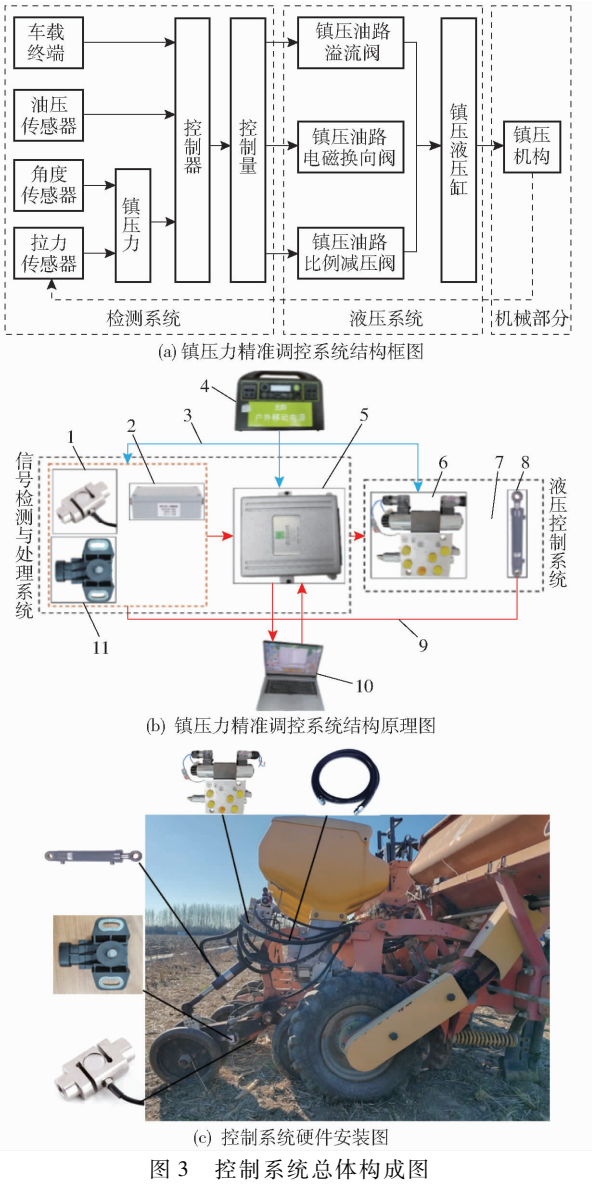
ε——镇压轮绕播种单体转动后,弹簧角度变化量,(°)

镇压力反作用力 F_Z 和初始角度 υ、η,可提前测量得到。θ 由角度传感器测量,F_T 可由拉力传感器测出。由图 2b 可知,θ 增大时,ε、λ、β 随之增大,α 则减小。通过 Solidworks 分析,ε 变化率大于 θ,α 变化率大于 β。在 F_T 不变时,镇压力随着 θ 增大而增加;在 θ 不变时,镇压力随着 F_T 增大而增加。镇压力与弹簧拉力、镇压轮角度变化之间呈一定相关性。

2 镇压力精准调控系统设计

2.1 调控系统总体组成

镇压力精准调控系统结构框图如图 3a 所示。该系统主要由镇压力检测单元、液压控制系统和用于镇压力调节的机械组件构成。检测单元包括拉力传感器、角度传感器、终端和 STM32 控制器等设备。液压控制系统由比例换向电磁阀、控制器和液压缸等组成。



(a) 镇压力精准调控系统结构框图

(b) 镇压力精准调控系统结构原理图

(c) 控制系统硬件安装图

图 3 控制系统总体构成图

Fig. 3 Control system overall composition diagrams

1. 拉力传感器 2. 变送器 3. 供电线路 4. 移动电源 5. STM32 控制器 6. 液压阀组 7. 输油管路 8. 液压油缸 9. 数据传输线路 10. 终端 11. 角度传感器

图 3b 为镇压力精准调控系统结构原理图,图 3c 为硬件安装示意图。在系统运行过程中,拉力传感器和角度传感器实时采集测量信号并传输至控制器,控制器通过模数转换器(ADC)将传感器电压信号转换为数字信号,并对实测数据进行处理,通过构建的关系模型得到镇压力。终端通过 RS-232 转 USB 串口向控制器发送设定的目标镇压力指令。控制器将获取的镇压力与设定目标值进行比较,通

过 PID 控制算法计算出新的控制量进行反馈。控制量通过(PWM)信号传递至比例换向阀，调节阀芯开度，实现对流量和流向的精确控制，驱动液压缸进行伸缩运动。

2.2　镇压力检测单元设计

拉力传感器选用南京天光电气科技有限公司 S 型拉力传感器，用于采集弹簧拉力信号，变送器输出电压为 0～3.3 V。角度传感器选择 Elobau 424A 型角度传感器，用于测量镇压轮绕播种单体角度变化。传感器参数如表 1 所示。

表 1　传感器相关参数

Tab.1　Sensor-related parameters

名称	参数	功能
拉力传感器	测量范围：0～2 000 N 精度：0.05%～0.1% 输入电压：12 V 输出电压：0～20 mV	测量弹簧拉力
变送器	额定输入：0～20 mV 供电电压：10～36 V 额定输出：0～5 V	拉力传感器信号放大、滤波
角度传感器	角度量程：－30°～30° 输入电压：5 V 输出电压：0.5～4.5 V 工作温度：－40～85℃	测量镇压轮起伏角度

图 4 为传感器信号采集模块结构框图。控制器采用 STM32 微控制器，通信采用 RS232 串口通信协议，波特率设置为 9 600 b/s。配置 2 路 ADC 通道，采集拉力传感器和角度传感器电压信号，采用限幅均值滤波法进行数据处理，提高了采集信号准确性和稳定性。

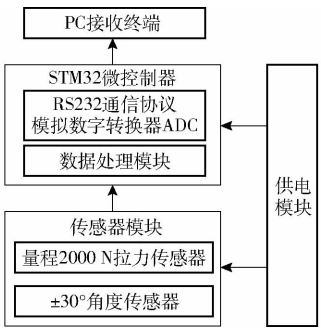


图 4　传感器信号采集模块结构框图

Fig.4　Sensor signal detection structure block diagram

2.3　液压控制系统设计

参照文献[8,24,26]，在玉米播种过程中，镇压强度控制在 0.5～0.65 kg/cm^2 范围内时，玉米出苗率较高。结合单体计算出对应目标镇压力为 150～210 N，综合考虑液压缸工作压力和伸缩行程，选择 HSG40×25－100 型单活塞双作用液压油缸，缸筒长度为 200 mm，行程为 100 mm，最大压力 16 MPa，推力 2 000 N。

图 5 为液压控制原理图。系统运行时，用户手动输入镇压力目标值，拉力传感器和角度传感器检测实时镇压力并发送到 PID 控制器，通过数据处理，控制器向液压系统发送控制信号，实现对液压缸执行机构位移精准控制。采用试凑法确定 PID 调节器比例系数 K_P、积分系数 K_I、微分系数 K_D 分别为 1.4、0.012、0.000 1。

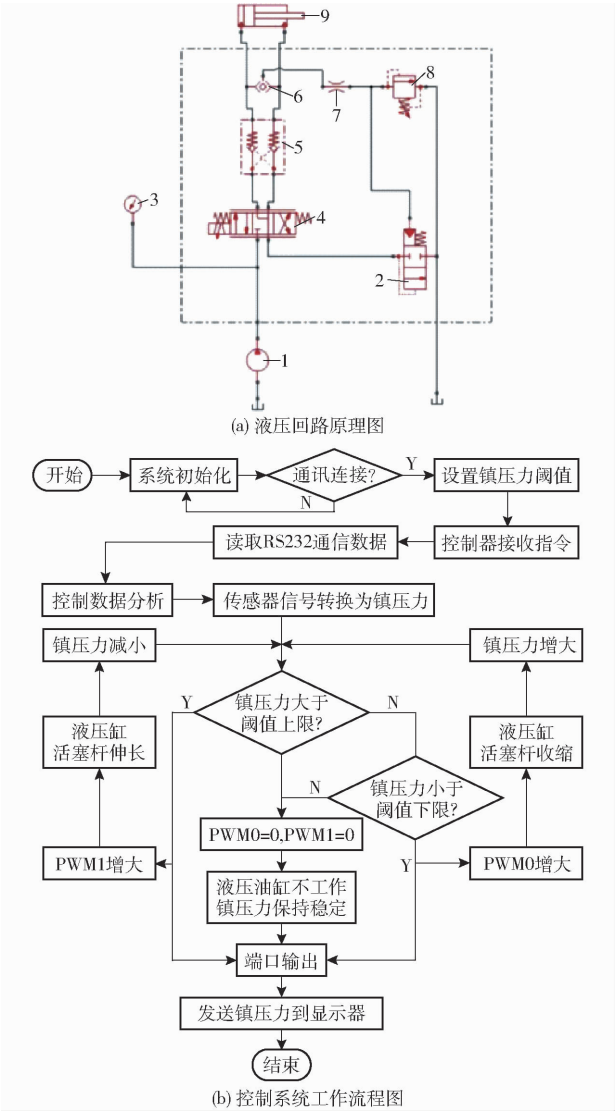


图 5　液压控制原理图

Fig.5　Hydraulic control schematics

1. 液压泵　2. 逻辑阀　3. 油压表　4. 比例换向电磁阀　5. 液控单向阀　6. 梭阀　7. 节流阀　8. 溢流阀　9. 液压油缸

2.4　上位机软件设计

操作界面设计允许用户配置目标镇压力及 PID 控制参数，并实时监测镇压力测量值和传感器数据。该界面基于 Python 编程语言进行开发，如图 6 所示。界面包括 3 部分：①显示机械调节方式目标值、实测值及角度变化值。②显示液压调节方式下镇压力目标值、实测值、角度变化值及弹簧拉力。③用于

调整 PID 控制器的相关系数。



图 6 软件操作界面

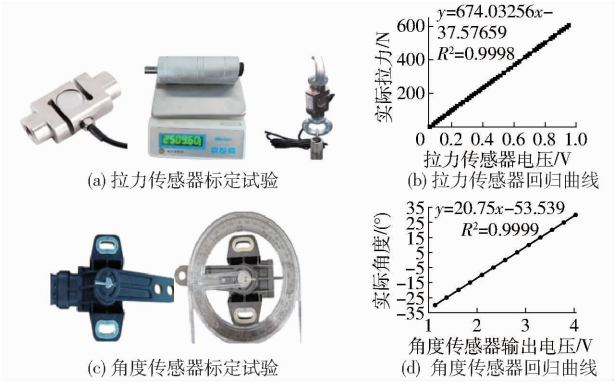
Fig. 6 Software operating interface

3 试验

3.1 标定试验

3.1.1 传感器标定试验

选用 S 型拉力传感器。利用电子天平测量物体质量后将其悬挂于拉力传感器下方,终端采集传感器输出的电压信号。通过逐步增加负载,获取传感器输出的不同电压。图 7b 为拉力传感器所受拉力与输出电压之间的回归曲线,决定系数 R^2 为 0.999 8。传感器性能测试结果表明,在 0 ~ 150 N 内,最大误差为 3.87 N,在 150 ~ 600 N 内,最大误差为 1.59 N,相对误差小于 0.54%。本研究所需拉力为 300 ~ 600 N,该传感器满足试验精度要求。



(a) 拉力传感器标定试验 (b) 拉力传感器回归曲线

(c) 角度传感器标定试验 (d) 角度传感器回归曲线

图 7 传感器标定试验与回归曲线

Fig. 7 Sensor calibration test and regression curve

选用 Elobau 424A 型角度传感器,通过旋转底部轴心调整输出电压。标定时,将指针固定在传感器轴心,并将传感器稳固在标准 360°量角器上,确保指针中心与量角器的零度刻度精确对齐,设定传感器起始零值。通过旋转指针以对应量角器上不同的刻度,获取传感器输出的相应电压。

角度传感器标定范围为 -30° ~ 30°,标定梯度为 5°。采集传感器在不同角度下相应电压。对角度与电压进行线性回归,线性回归曲线如图 7d 所示。决定系数 R^2 为 0.999 9。通过传感器性能测试,最大误差 0.27°,均方根误差小于 0.13°,准确度高,满足试验要求。

3.1.2 液控调节镇压力标定试验

为建立弹簧拉力、镇压装置角度变化与镇压力之间的关系模型,需进行镇压力标定试验。采用基于 PID 的液压控制调节方法,通过 PWM 信号控制比例换向阀阀芯开度,调节液压缸行程,改变弹簧力。

标定前,确保镇压轮与限深轮在地面上保持水平,如图 8 所示。将角度传感器数值设置为 0,以此作为镇压装置相对于播种单体基准角度。标定时,利用拖拉机升降阀组将播种单体整体提升至适宜高度。在限深轮下方放置支撑板,以完全承载播种单体重量,并将电子秤安置于镇压轮下方。通过添加垫片微调镇压轮高度,使其与限深轮保持水平,此时角度传感器读数为 0。



图 8 镇压力标定试验台

Fig. 8 Calibration test bench of compaction pressure

1. 终端数据采集 2. 限深轮支撑板 3. 电子秤

标定过程中,考虑动态作业时镇压装置起伏状况,通过在电子秤上添加垫片,调整镇压装置角度。每次添加垫片后,需要对电子秤进行去皮校准,消除因垫片增加引起的零点漂移。镇压轮与电子秤之间的作用力即为镇压力,通过电子秤显示测得的数值。拉力传感器初始值在 300 ~ 600 N 内分为 11 个梯度,对每个梯度不同角度进行标定试验,为防止油缸伸缩,拉力传感器调节到目标值时,关闭 PWM 信号。获得不同弹簧拉力与镇压装置角度变化下的镇压力电子秤实测值,采用受力分析关系式作为主函数,利用 Origin 软件进行非线性曲面模型拟合。拟合方程为

$$z = 0.010\,48xy - 0.520\,52x + 5.542\,28y + 375.409\,39 \tag{5}$$

式中 z——镇压力测量值,N

x——拉力传感器采集值,N

y——角度传感器采集值,(°)

如图 9 所示,其回归曲线决定系数 R^2 为 0.991 1。

该模型可应用于实际作业，在水平位置时，通过设定镇压力目标值应用于调控系统。

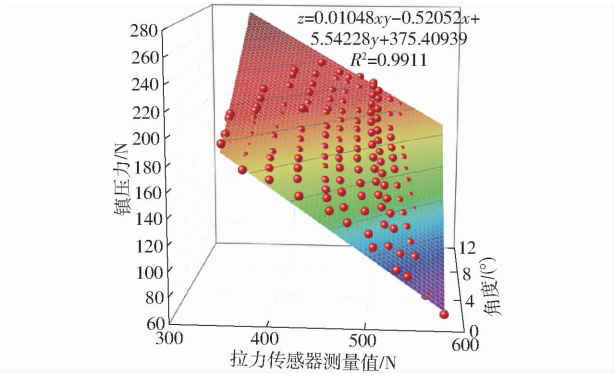


图 9　镇压力拟合曲线

Fig. 9　Compaction pressure fitting curve

3.1.3　机械调节镇压力标定试验

机械式调节作为对照试验组，由于机械式调节依靠作业前挡位调节，作业中镇压力主要影响因素为装置起伏角，因此在机械调节的镇压装置上安装角度传感器，通过试验标定镇压力与抬升角度之间的关系。调节弹簧拉杆至 3 个不同挡位进行标定，记录电子秤测量值与角度传感器采集信号，并进行后续数据处理与分析。拟合曲线如图 10 所示。

由图 10 可知，镇压装置与播种单体水平为初始状态，当机械调节挡位分别为 1、2、3 时，镇压力与角度传感器测量值呈线性关系，其决定系数 R^2 不低于 0.9925。镇压力理论计算值与实际测量值间误差小于 1.4%。此模型可用于实际作业，根据调节挡位与角度传感器采集值来获得镇压力。

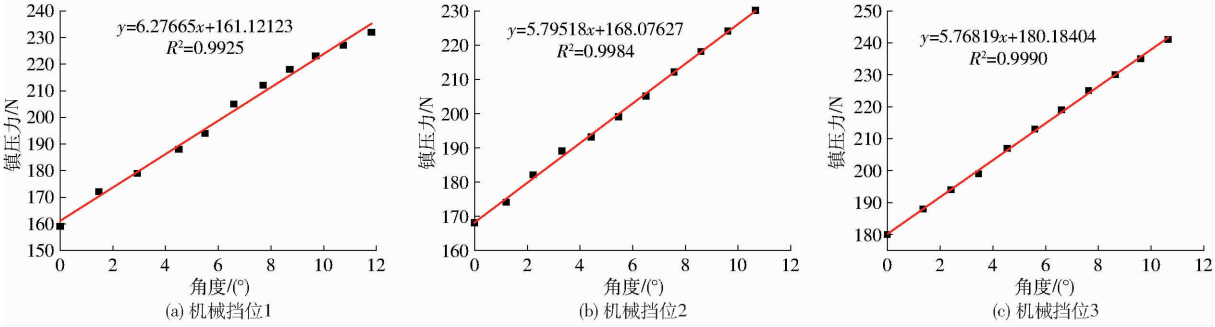


图 10　机械调节镇压力拟合曲线

Fig. 10　Mechanical adjustment compaction pressure fitting curve

3.2　镇压力控制系统阶跃响应试验

镇压力控制系统主要通过液压油缸伸缩调节弹簧拉力，进而调整镇压力。为验证系统响应性能，以镇压力为对象，在水平地面上进行试验。由机械调节标定结果可知，常用的 3 个挡位在水平状态下所测镇压力分别为 159、168、182 N。试验时，设定镇压力目标值为 150、180、200 N，以进行镇压力控制系统的阶跃响应测试。通过 PWM 信号控制比例换向阀阀口开度，从而调节液压油缸伸缩以调整弹簧力。为提高响应速度，试验前需确定能使油缸动作的 PWM 阈值，以消除死区信号，然后再调整 PID 参数。响应曲线如图 11 所示。

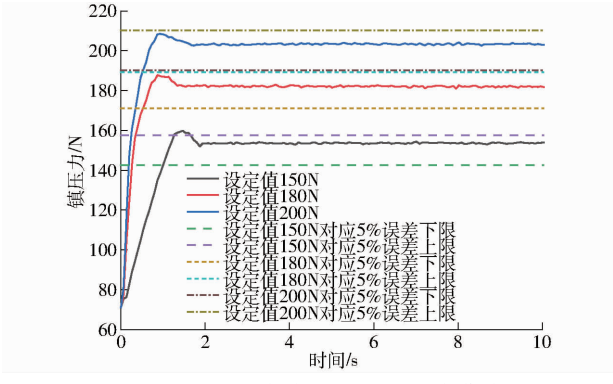


图 11　镇压力控制系统阶跃响应曲线

Fig. 11　Step response curves of compaction pressure control system

在设定目标值为 150、180、200 N 时，镇压力控制系统最大调节时间为 1.33 s，稳态误差最大为 3.5 N，超调量 2.5% ~3.9%。采用试验指标均值来表征系统控制性能，得到超调量均值为 3.23%，稳态误差均值为 2.7 N，调节时间均值为 1.13 s，可满足控制系统要求。

3.3　田间试验

3.3.1　试验条件和方法

2024 年 9 月在北京市昌平区国家精准农业研究示范基地开展田间试验。试验地块长 120 m，宽 50 m，采用美国 SPECTRUM 公司 SC－900 型土壤紧实度仪测得地表 5 cm 下土壤紧实度为 7 N/cm^2。镇压力精准调控系统基于现代农装科技股份有限公司生产的 2BQX－6 型玉米免耕精密播种机进行设计，经过安装和调试，并与机械调节播种单体进行了镇压力性能对比试验。

根据农艺要求，选择机械调节挡位 1、3 水平时对应的镇压力 159、182 N 为试验目标值。试验在作业速度 5、7、9 km/h 下进行。拖拉机上安装北京农芯科技有限公司的北斗卫星导航系统，内嵌测速模块，驾驶员可根据车载终端显示的实测车速进行调控。

拖拉机启动前,需预先设定目标镇压力。镇压力调控系统通过终端设定目标镇压力,机械调节方式通过手动调节镇压力挡位进行设置,作业过程中无法调节镇压力。田间试验如图 12 所示。为排除加减速段数据,距离地头两端 30 m 内数据不记录。



图 12 田间试验

Fig. 12 Field experiment

1. 机械调节单体 2. 调控系统单体

3.3.2 试验结果分析

从上位机软件中导出镇压力测量数据,得到不同作业速度和调节方式下镇压力随时间变化曲线。设定的目标镇压力分别为机械调节挡位 1 和挡位 3 时的 159、182 N。图 13 为镇压力测量数据,结果表明,基于 PID 液控调节方式下的镇压力在目标值附近呈小幅波动,而机械挡位调节镇压力震荡幅度较大,且镇压力大部分高于设定值。

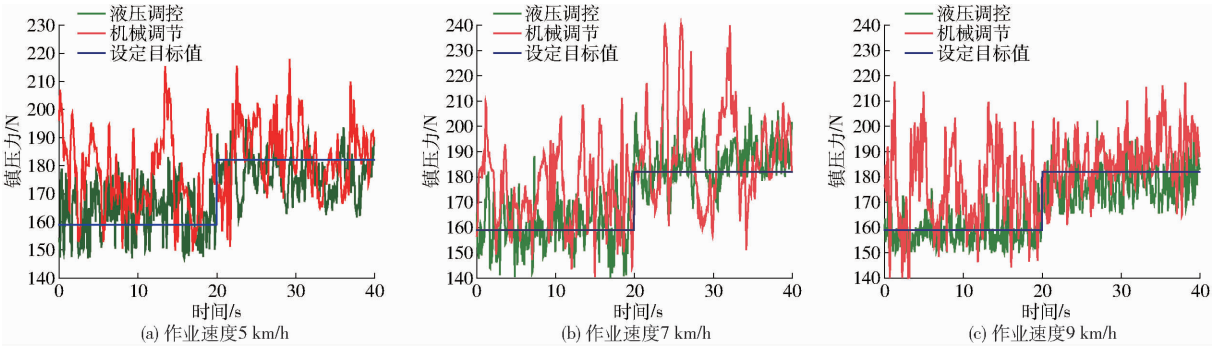


图 13 不同速度和调节方式下镇压力变化曲线

Fig. 13 Change curves of compaction pressure at different speeds and adjustment modes

对采集的镇压力进行处理,结果如表 2 所示。在不同作业速度和不同镇压力目标值下,机械调节方式相对误差为 5.05% ~11.48%,液控调节方式相对误差为 3.08% ~5.38%。在 3 种速度条件下,当目标镇压力设定为 159 N 时,机械式调节相对误差最大值为 11.48%,最大均方根误差为 22.49 N。液控调节相对误差最大值为 5.38%,最大均方根误差为 10.09 N。当目标镇压力为 182 N 时,机械式调节相对误差最大为 8.38%,均方根误差为 20.27 N,液控调节相对误差最大为 4.58%,均方根误差为 8.98 N,均低于机械调节方式误差。

目标镇压力从 159 N 增至 182 N,机械调节方式下镇压力震荡幅度降低,稳定性有所改善。而在液控调节情况下,镇压力震荡幅度变化不明显,且整体振幅始终低于机械调节方式,这表明液控调节在镇压力控制上的稳定性更佳。

田间试验结果表明,在试验条件下,镇压力最大调节幅值小于 26 N,平均调节幅值小于 8.6 N,最大调节时间小于 0.27 s,平均调节时间小于 0.09 s,系统在工作过程中能够有效保持目标镇压力,具有较高的稳定性。

综上所述,在不同作业速度和镇压力目标值条件下,液控调节方式镇压力相对误差和均方根误差显著低于机械调节方式。在 3 种作业速度条件下,机械调节方式下镇压力变化范围显著高于液控调节方式,且大多数测量值明显高于设定值,这表明其受地形变化影响较大。相比之下,液控调节的镇压力测量值在设定值附近小幅波动,整体展现出更高的稳定性。因此,液控调节方式在复杂工作环境中的适应能力更强,镇压力调节效果也更加稳定。

表 2 镇压力控制系统田间测试结果

Tab. 2 Field test results of compaction pressure control system

作业速度/(km·h^{-1})	调节方式	镇压力		相对误差/%	均方根误差/N
		目标值/N	测量均值/N		
5	液控	159	163.62	5.38	10.09
	机械		176.50	11.48	22.15
	液控	182	177.03	3.86	8.80
	机械		184.22	5.11	11.67
7	液控	159	160.28	4.58	9.36
	机械		174.28	10.61	20.70
	液控	182	185.62	3.76	8.71
	机械		190.24	8.38	20.27
9	液控	159	158.34	3.08	6.63
	机械		174.87	11.43	22.49
	液控	182	178.47	4.19	8.98
	机械		187.31	5.05	11.77

4　结论

（1）设计了一种基于 PID 控制的玉米播种单体镇压力精准调控系统，实现了镇压力的闭环控制。阶跃响应试验结果表明，镇压力精准调控系统的调节时间均值为 1.13 s，超调量均值为 3.23%，稳态误差均值为 2.7 N。

（2）田间试验结果表明，当作业速度为 5、7、9 km/h 时，采用液控调节方式对镇压力的控制相对误差为 3.08% ~5.38%，显著低于机械调节方式的 5.05% ~11.48%。液控系统调节的均方根误差为 6.63 ~ 10.09 N，而机械调节时的均方根误差为 11.67 ~22.49 N。结果表明，基于 PID 控制的镇压力精准调控方法具有较高的控制精度和稳定性，该装置为玉米免耕精密播种提供了一种新的技术和装备支撑。

参　考　文　献

[1] 赵霞，黄瑞冬，李潮海，等. 播后镇压覆盖对土壤保水保温和玉米幼苗生长的影响[J]. 玉米科学，2013，21(5)：87 -93，99.
ZHAO Xia, HUANG Ruidong, LI Chaohai, et al. Effect of compaction and wheat straw mulching after sowing on preserving water and insulation of soil and growth of maize seedling[J]. Journal of Maize Science, 2013, 23(5): 87 - 93, 99. (in Chinese)

[2] 杨丽，颜丙新，张东兴，等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报，2016，47(11)：38 -48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38 - 48. (in Chinese)

[3] GOMEZ I, THIVANT L. Training manual for organic agriculture[M]. Scientific Publishers-UBP, 2017.

[4] 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 and Tillage Research, 2011, 114(1): 1 - 8.

[5] HANNA H M, STEWARD B L, ALDINGER L. Soil loading effects of planter depth-gauge wheels on early corn growth[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2010, 26(4): 551 - 556.

[6] 刘其潼，张晋国，杨娜，等. 玉米免耕深松全层施肥精量播种机播前碎土镇压轮的研制[J]. 农机化研究，2015，37(7)：127 -130.
LIU Qitong, ZHANG Jinguo, YANG Na, et al. Study on the pulverizer repression wheel before sowing of the precise planter with no-tillage subsoil dnd whole layer fertilization[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(7): 127 - 130. (in Chinese)

[7] 刘忠军，刘立晶，杨学军，等. 指夹式玉米免耕精密播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报，2016，32(增刊 2)：1 -6.
LIU Zhongjun, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of no-till precision planter for corn[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp. 2): 1 - 6. (in Chinese)

[8] 崔正果，李秋祝，张玉斌，等. 玉米秸秆全量粉碎耕翻还田条件下播种深度与镇压强度对玉米出苗率的影响[J]. 东北农业科学，2018，43(6)：16 -19.
CUI Zhengguo, LI Qiuzhu, ZHANG Yubin, et al. Effects of different strength of compaction and sowing depth on emergence rate of maize under the condition of entire returning of maize straw after smashed[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2018, 43(6): 16 - 19. (in Chinese)

[9] MULLER J, MODOLO A J, TRENTIN R G, et al. Tractive demand, soil mobilization parameters, and corn yield in compacted oxisol[J]. Engenharia Agrícola, 2019, 39: 89 - 96.

[10] AFZALINIA S, ZABIHI J. Soil compaction variation during corn growing season under conservation tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 137: 1 - 6.

[11] 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)

[12] 尤晶晶，左青松，李静，等. 播深和镇压对机直播油菜成苗率、农艺性状和籽粒品质的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版)，2023，44(3)：98 -104.
YOU Jingjing, ZUO Qingsong, LI Jing, et al. Influences of sowing depth and soil compaction on seedling rate, agronomic traits and seed quality of rapeseed[J]. Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Science Edition), 2023, 44(3): 98 - 104. (in Chinese)

[13] 谭凯敏，杨长刚，柴守玺，等. 秸秆还田后覆膜镇压对旱地冬小麦土壤温度和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究，2015，33(1)：159 -164.
TAN Kaimin, YANG Changgang, CHAI Shouxi, et al. Effect of mulching film after straw returning on soil temperature and grain yield of dryland winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1): 159 - 164. (in Chinese)

[14] 郭慧，陈志，贾洪雷，等. 锥形轮体结构的覆土镇压器设计与试验[J]. 农业工程学报，2017，33(12)：56 -65.
GUO Hui, CHEN Zhi, JIA Honglei, et al. Design and experiment of soil-covering and soil-compacting device with cone-shaped structure of wheel[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 56 - 65. (in Chinese)

[15] 赵淑红，刘宏俊，谭贺文，等. 丘陵地区双向仿形镇压装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2017，48(4)：82 -89.

ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, TAN Hewen, et al. Design and experiment of bidirectional profiling press device for hilly area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 82 - 89. (in Chinese)

[16] 赵淑红,谭贺文,王加一,等. 多功能集成式播种开沟器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(11):58 - 67.
ZHAO Shuhong, TAN Hewen, WANG Jiayi, et al. Design and experiment of multifunctional integrated seeding opener[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(11):58 - 67. (in Chinese)

[17] 陈海涛,徐源,史乃煜. 三向可调式 V 型覆土镇压器设计与试验[J]. 东北农业大学学报,2018,49(11):65 - 73.
CHEN Haitao, XU Yuan, SHI Naiyu. Design and experiment on three-way adjustable V-type soil-covering and soil-compacting device[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(11): 65 - 73. (in Chinese)

[18] 刘宏俊,韩济远,陈佳奇,等. 丘陵地区刚性镇压轮性能仿真与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(11):114 - 122.
LIU Hongjun, HAN Jiyuan, CHEN Jiaqi, et al. Performance simulation and experiment on rigid press wheel forhilly area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 114 - 122. (in Chinese)

[19] 康迪鑫,孙伟,张涛,等. 干旱地区深松灭茬镇压联合整地机的研究与试验[J]. 中国农业大学学报,2018,23(1):133 - 142.
KANG Dixin, SUN Wei, ZHANG Tao, et al. Study and experiment on subsoiling, stubble-breaking and pressing soil combined tillage machine in arid area[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(1): 133 - 142. (in Chinese)

[20] 侯守印,魏志鹏,史乃煜,等. 弹性螺旋式覆土镇压器的设计与参数优化试验[J]. 农机化研究,2021,43(3):42 - 51.
HOU Shouyin, WEI Zhipeng, SHI Naiyu, et al. Design and parameter optimizing test of elastic spiral soil covering roller[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(3):42 - 51. (in Chinese)

[21] 郭慧,王刚,赵佳乐,等. 锥形覆土镇压轮镇压强度力学模型[J]. 实验技术与管理,2021,38(12):107 - 111,127.
GUO Hui, WANG Gang, ZHAO Jiale, et al. Soil pressure mechanical model of conical soil covering-compacting wheels[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(12): 107 - 111,127. (in Chinese)

[22] 肖涵. 免耕播种机仿生镇压轮优化设计与试验研究[D]. 长春:吉林农业大学,2023.
XIAO Han. Optimal design and experimental research on bionic repression wheel of no-till planter[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[23] 屈鑫誉. 基于玉米条耕技术的碎土镇压机具的设计与试验[D]. 长春:吉林农业大学, 2023.
QU Xinyu. Design and testing of a crushed soil suppression machine based on corn strip-till technology[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[24] 刘芳,高筱钧,贾宪,等. 高速精量播种机阿基米德螺线型弧面双齿盘覆土装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(6):91 - 100,120.
LIU Fang, GAO Xiaojun, JIA Xian, et al. Design and experiment of Archimedean spiral-type arc double-toothed disc soil-covering device for high-speed precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(6):91 - 100,120. (in Chinese)

[25] DUGATO D, PALMA M A Z. Pressure and angle of the seed-fertilizer drill press wheel on corn emergence[J]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2018, 22(10): 726 - 731.

[26] 王景立,马旭,卢波,等. 精密播种机可变力苗带镇压器的试验研究[J]. 吉林农业大学学报,2009,31(4):472 - 475.
WANG Jingli, MA Xu, LU Bo, et al. Experimental study on seeding strip press roller with variable pressure of precision planter[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2009, 31(4): 472 - 475. (in Chinese)

[27] 耿元乐,钟晓康,王宪良,等. 免耕播种机镇压力精准调控研究[J]. 中国农机化学报,2022,43(10):141 - 148.
GENG Yuanle, ZHONG Xiaokang, WANG Xianliang, et al. Research on precise regulation of no-tillage seeder compaction pressure[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(10): 141 - 148. (in Chinese)

[28] 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 - 68,42.
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 - 68,42. (in Chinese)

[29] 刘金凯. 精整地机设计与镇压力反馈控制技术研究[D]. 镇江:江苏大学,2019.
LIU Jinkai. Research on the design of soil preparation machine and feedback control technology of compacting force on roller [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)

[30] 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)

[31] 付作立,宫志超,褚青昕,等. 高速免耕玉米播种单体镇压力主动调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(11):273 - 284.
FU Zuoli, GONG Zhichao, CHU Qingxin, et al. Design and test of active control system for soil compaction of high speed no-tillage maize planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(11):273 - 284. (in Chinese)