doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.007

基于下压力与镇压力联合控制的玉米播种机播深控制系统研究

姜业元[1,2]　崔　涛[1,2]　张东兴[1,2]　杨　丽[1,2]　董佳琪[1,2]　张传阔[1,2]

(1.中国农业大学工学院,北京 100083;2.农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室,北京 100083)

摘要:播种深度是保证玉米出苗和提高产量的关键因素,为提升玉米播种作业中播深控制的动态稳定性与一致性,设计了一种基于电液比例调节的下压力与镇压力主动控制系统,构建了播种单体受力模型,并提出基于 PID 算法的闭环压力调控策略,实现对复杂田间地表起伏的快速响应。系统采用比例阀精准调控压力,配合高精度传感器采集播种机作业状态数据,通过控制器动态调节油缸输出力,实现播深的稳定控制。通过田间对比试验,分析了传统被动弹簧调节与所提主动控制策略在不同速度(6、8、10 km/h)下的播深稳定性与振动特性,结果表明:主动控制模式下播深变异系数降低 6.25%,振动均方根值(RMS)与峰-峰值平均分别下降 46.3% 和 39.6%,系统播深控制性能提升显著。频域分析显示振动能量主要集中在 0~10 Hz,主动控制策略可有效抑制主频及其倍频激励的振动响应。研究成果可为玉米播种关键作业参数的动态调控提供理论支撑。

关键词:玉米播种机;播深控制;电液控制;下压力;镇压力

中图分类号:S223.2+3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0083-11　　**OSID**:

Seeding Depth Control System of Maize Planter Based on Combined Control of Downforce and Firming Pressure

JIANG Yeyuan[1,2]　CUI Tao[1,2]　ZHANG Dongxing[1,2]　YANG Li[1,2]　DONG Jiaqi[1,2]　ZHANG Chuankuo[1,2]

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

2. *Key Laboratory of Soil-Machine-Plant System Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Seeding depth is a key factor in ensuring uniform emergence and improving maize yield. To enhance the dynamic stability and consistency of depth control during maize sowing, an active control system for downforce and firming pressure based on electro-hydraulic proportional regulation was developed. A mechanical force model of the seeding unit was established, and a closed-loop pressure regulation strategy based on a PID algorithm was proposed to achieve rapid response to complex field undulations. The system utilized proportional valves to precisely regulate pressure, and high-precision sensors were employed to collect real-time operation data of the planter. The controller dynamically adjusted the output force of hydraulic cylinders to achieve stable seeding depth control. Field comparison tests were conducted to evaluate the performance of the proposed active control strategy against the traditional passive spring regulation at different sowing speeds (6 km/h, 8 km/h, and 10 km/h). Results showed that under active control, the coefficient of variation of seeding depth was reduced by 6.25%, and the root mean square (RMS) and average peak-to-peak amplitude of vibration were reduced by 46.3% and 39.6%, respectively, indicating a significant improvement in seeding depth control performance. Frequency domain analysis revealed that vibration energy was mainly concentrated in the range of 0~10 Hz, and the proposed control strategy effectively suppressed the response of fundamental and harmonic excitations. The research result can provide theoretical support for the dynamic regulation of key parameters in maize sowing operations.

Key words: maize planter; seed depth control; electro-hydraulic control; downforce; firming pressure

收稿日期:2025-06-30　修回日期:2025-07-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2000502)和财政部和农业农村部:国家现代玉米产业技术体系项目(CARS-02-35)

作者简介:姜业元(1999—),男,博士生,主要从事农业装备与计算机测控研究,E-mail:yeyuan_j0868@163.com

通信作者:崔涛(1985—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业装备与计算机测控研究,E-mail:cuitao@cau.edu.cn

0 引言

播种深度(播深)是玉米等作物种子顺利出苗和后期生长的关键因素之一。合理一致的播种深度不仅影响出苗整齐度,还直接关系到作物产量和资源利用率[1-3]。然而,实际田间作业时由于地表起伏、土壤物理性质差异、作业速度变化等因素,播种深度波动大,播种一致性差,常造成“大小苗”现象,进而影响产量[4-5]。

传统播种机多采用弹簧或机械配重方式施加下压力,虽结构简单、成本低,但调节响应滞后,难以适应土壤阻力变化和地表起伏[6]。播后镇压作为影响覆土密实度和播深稳定性的关键环节,其压力若过大或过小均可能对幼苗出苗与生长造成不利影响[7]。目前,镇压力调节方式多为固定机械结构,缺乏动态调控能力[8-11]。近年来,国内外研究者尝试引入液压、气压等主动执行元件,通过压力传感器及闭环控制技术,实现下压力或镇压力的主动调节,从而提升播深控制精度与适应能力。李玉环等[12]设计了一种玉米气动播深控制系统,采用电动推杆驱动覆土器,并通过压力传感器调节播深,使播深合格率达到 90% 以上。JING 等[13]基于 PID 算法设计播种行单元的电压下压力控制系统,能够提高 3.12% ~34.38% 的播深合格率。赵慧慧[14]基于全桥式应变片传感器提出了双侧下压力控制与检测方法,并通过已耕与免耕条件下的试验验证了该系统在提升播深稳定性方面的有效性。黄东岩等[15]和高原源等[16]基于气压方式,结合压电薄膜与销轴传感器测量限深轮对地压力,实现播种单体下压力调节。白慧娟等[17]和夏徐隆[18]则针对镇压力控制开展研究,提出基于电液控制的镇压系统,有效降低镇压力均方根误差与土壤压实度变异系数。国外方面,NIELSEN 等[19]设计了播深闭环调控系统,播深误差由 ±8 mm 降低至 ±2 mm;VIRK 等[20]则结合土壤电导率开展下压力调控试验,表明应动态匹配土壤阻力以保证播种质量。此外,部分研究已探索基于比例阀与传感反馈的闭环控制方法[21],但缺少下压力与镇压力联合调控的相关研究。因此,深入开展具有实际适应性的下压力与镇压力调控系统研究,具有重要的理论与应用价值。

此外,随着振动信号分析在农业装备中的应用不断深入,研究表明播种单体的振动特性(如文献[22]发现的 3 ~ 10 Hz 低频振动)会通过影响限深轮与土壤的接触状态进一步干扰播深稳定性,而作业速度的提升可能加剧此类振动[23-26]。

本文提出一种基于下压力与镇压力双变量联合控制的播深稳定性控制系统,设计集成液压执行、实时传感和闭环调控的播种单体结构。通过构建应变片与销轴组合的压力检测方法,实现下压力与镇压力的高精度监测,并开发机-电-液联合控制装置。系统利用传感器反馈驱动比例减压阀进行实时调节,在田间试验中展现出优于传统机械结构的播深一致性与动态响应性能,为高质量播种作业提供技术支撑。

1 系统组成与工作原理

1.1 系统组成

为完成下压力(限深轮对地施加的垂向力)和镇压力(镇压轮对播后种沟施加的垂直压实力)的动态调节,实现播深一致性,对雷沃 2BMQE-6E 型玉米免耕精量播种机的播种单体进行了结构优化。播种单体结构如图 1 所示,主要由种箱、排种器、机架、开沟圆盘、限深轮、覆土轮、镇压轮、破茬轮、下压油缸、镇压油缸及配套的传感器等组成。

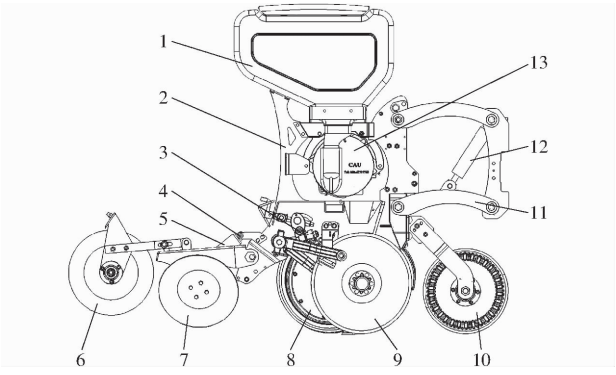


图 1 播种单体结构图

Fig. 1 Seeding monomer structure diagram

1. 种箱 2. 机架 3. 下压力传感器 4. 镇压力传感器 5. 镇压油缸 6. 镇压轮 7. 覆土轮 8. 限深轮 9. 开沟圆盘 10. 破茬轮 11. 平行四杆仿形机构 12. 下压油缸 13. 排种器

下压力传感器与镇压力传感器分别布置在限深轮臂侧面和镇压轮的液压油缸铰接点部位,用于实时获取作业过程中压力变化情况。两组液压缸分别控制播种单体和镇压装置的压力输出,配合仿形机构可实现单体随地形自动调整,提高播种一致性。

1.2 工作原理

系统采用电液联合调控方式,实现播种单体下压力与镇压力的精准调节与实时监测,如图 2。用户通过设定目标压力值,控制器接收 PC 端经 PCAN 下载的程序后开始运行,根据预设参数进行实时控制。下压力与镇压力分别由对应油缸施加,其控制信号由先导式比例减压阀 A 和 B 调节,经插头放大板 A 和 B 驱动后控制比例阀输出,实现油缸活塞杆的伸缩,从而调节下压力与镇压力。系统在下压力机构和镇压力机构上分别安装压力传感器,用于采

集实时施力信号，模拟信号经放大后送入 A/D 模块，同时对两个油缸的油压进行监测，并将信号输入至控制器。控制器内置传感器与力的标定关系，根据反馈信号计算并输出调节电压，形成闭环控制。所有监测数据通过 CAN 总线传输至显示屏，实时显示下压力、镇压力及油压变化，实现播种过程的动态监控与联动调控，为播深控制的稳定性和一致性提供支撑。

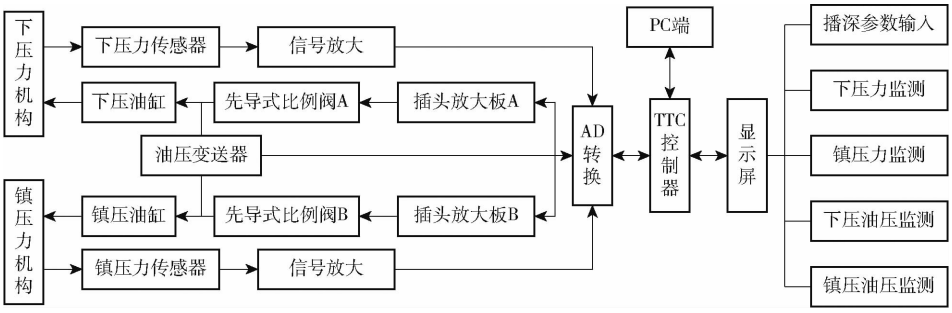


图 2　工作原理图

Fig. 2　Working schematic

2　播种单体压力检测方法与单体受力分析

2.1　播种单体受力分析

2.1.1　单体受力分析

对单个播种单体进行力学分析，根据图 3，由竖直方向上受力平衡得

$$F_{Nz}+F_{Nf}+F_{Nx}+F_{Nk}-F_Z\sin\delta-F_X\sin\gamma-G=0 \tag{1}$$

式中　γ——下压油缸与单体机架参考面夹角，(°)

δ——镇压油缸与单体机架参考面夹角，(°)

F_X——下压油缸施加的力，N

F_Z——镇压油缸施加的力，N

G——单体重量，N

F_{Nx}——地面对限深轮支持力，N

F_{Nk}——地面对开沟器的支持力，N

F_{Nz}——地面对镇压轮支持力，N

F_{Nf}——地面对覆土轮支持力，N

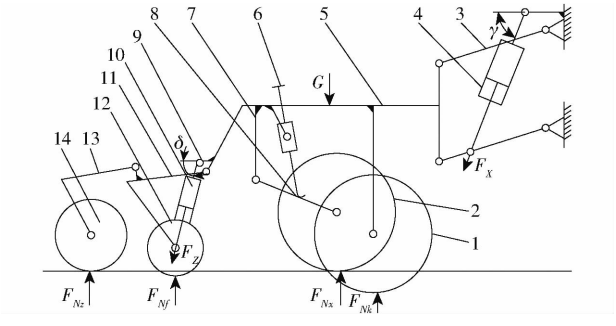


图 3　播种单体受力示意图

Fig. 3　Schematic of stress of sowing monomer

1. 开沟圆盘　2. 限深轮　3. 平行四杆仿形机构　4. 下压油缸　5. 机架　6. 限深轮调节手柄　7. 限深轮臂　8. 下压力传感器　9. 镇压力传感器　10. 镇压油缸　11. 覆土轮支架　12. 覆土轮　13. 镇压轮支架　14. 镇压轮

由于镇压覆土机构铰接在播种单体上，所以液压缸的下压力主要作用在开沟圆盘和限深轮上。下压力的有效分配直接影响开沟器入土深度与限深轮稳定性，通过调节液压缸的输出力及其作用角度 γ，可实现播种单体开沟与限深的动态调控。

2.1.2　限深轮臂受力分析

对限深轮臂进行受力分析，如图 4 所示，点 A 为限深轮臂与机架铰接点，点 O 为重心，点 B 为限深轮臂与挡块发生接触的位置，该处结构发生变形，内部应力通过安装在限深轮臂上的应变片进行测量，进而获取限深轮受到的作用力信息，点 C 为限深轮臂与限深轮铰接点。

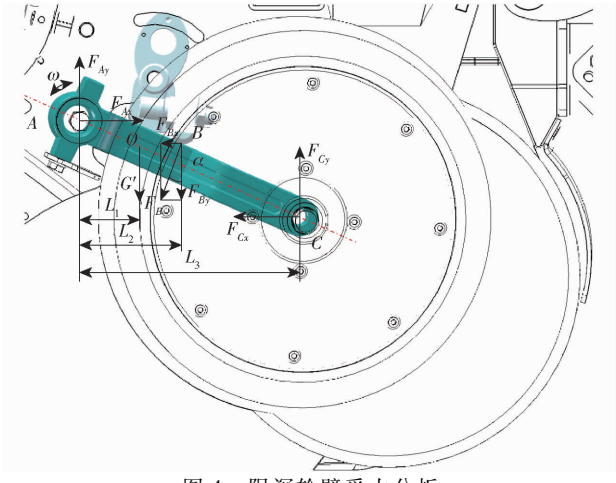


图 4　限深轮臂受力分析

Fig. 4　Force analysis of depth-limiting wheel arm

由图 4 可得，其受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_{By}=F_B\cos\alpha \\ F_{Bx}=F_B\sin\alpha \\ F_{By}+G'-F_{Ay}-F_{Cy}=0 \\ F_{Ax}-F_{Bx}-F_{Cx}=0 \\ M_A(F)=G'L_1+F_{By}L_2-F_{Cy}L_3 \end{cases} \tag{2}$$

式中　G'——限深轮臂受到的重力，N

α——限深轮臂与单体机架参考面的夹角，(°)

L_1、L_2、L_3——重心 O、点 B、点 C 与点 A 的距离

F_B——应变片测得的限深轮臂垂向受力，方向垂直于臂体表面安装面

F_{Bx}、F_{By}——F_B 水平和竖直方向分力，N

F_{Ax}、F_{Ay}——点 A 水平和竖直方向受力，N

F_{Cx}、F_{Cy}——点 C 水平和竖直方向受力，N

$M_A(F)$——点 A 处所受力矩，N·m

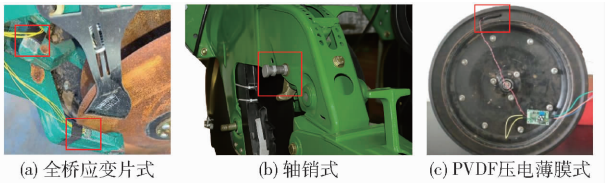
当点 A 力矩平衡时，即 $M_A(F)=0$ 时，有

$$F_B=\frac{F_{Cy}L_3-G'L_1}{\cos\alpha L_2} \tag{3}$$

由式(3)可知，应变片安装点所受力矩主要取决于两个因素：应变片到限深轮臂与主机架铰接点 A 的距离；限深轮铰接点 C 处竖直方向上的支承力 F_{Cy}，即地面对限深轮臂的作用力。由于该作用力即为本文定义的下压力，因此，应变片输出信号与下压力之间具备明确的力学关联，表明该方法在理论上具有可行性。

2.2 下压力检测方式及安装位置台架对比试验

为筛选适用于播种机下压力监测系统的传感器类型，选取了当前常见的 3 类信号采集装置进行性能对比试验，分别为：全桥应变片式传感器、Precision Planting 公司推出的轴销式传感器以及 PVDF 压电薄膜式传感器，如图 5。



(a) 全桥应变片式 (b) 轴销式 (c) PVDF压电薄膜式

图 5 下压力检测传感器选型

Fig. 5 Selection of down pressure detection sensor

试验结果表明(表 1)，全桥应变片式传感器响应性能与精度均优于其他两类传感器，最终被选为播种机下压力控制系统的检测方式。相较之下，Precision Planting 公司轴销式传感器检测性能对受力方向较为敏感。当作用力方向与应变片垂直时响应效果较好，若受力方向与粘贴方向一致，则难以形成应变，导致下压力变化无法准确捕捉。另外，PVDF 压电薄膜传感器受限于有线连接，在实际工作中由于限深轮会转动导致有线连接无法实现。因此，研究选用全桥应变式传感器作为下压力检测方案。

限深轮下压力检测所用应变传感器为 RunesKee 公司生产的 RK－23 型集成式电阻应变全桥模块，内部采用 350 Ω 应变片构成全桥电路，工作电压 5 V，输出为连续模拟信号。针对全桥应变片的粘贴位置，进行了标定试验来比较限深轮臂与限深轮手柄的性能，如图 6。

表 1 传感器选型对比试验结果

Tab. 1 Comparison of experimental results of sensor selection

传感器类型	响应时间/s	测量精度/%
全桥应变式传感器	0.6	0.34
轴销式传感器	1.4	0.96
PVDF 压电薄膜式传感器	1.0	0.83

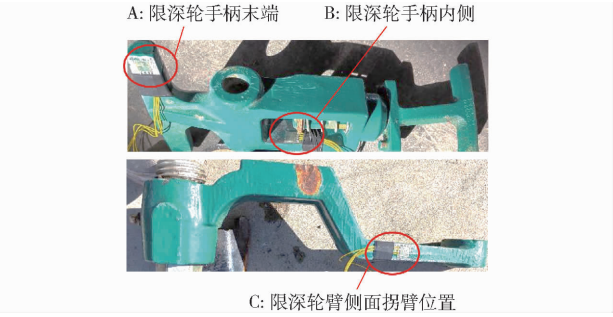


图 6 传感器安装位置

Fig. 6 Sensor installation location

在 3 个传感器安装位置分别施加 20 kg 和 40 kg 载荷，每种载荷条件下均进行 10 次重复试验，将传感器测得值与电子秤测量的实际值进行比较，结果显示限深轮臂侧面拐臂位置能更精确地反映实际下压力值(表 2)。因此，确定全桥应变式传感器的最佳安装位置为限深轮臂侧面拐臂位置。

表 2 传感器安装位置试验结果

Tab. 2 Test results of sensor installation position

载荷/kg	安装位置	测量精度/%
20	A	1.50
	B	1.01
	C	0.81
40	A	0.99
	B	1.52
	C	0.84

2.3 镇压力检测方式及安装位置

根据镇压轮的结构布置特点，镇压油缸设置于镇压轮支架与播种单体之间的铰接连接处，其作业过程中所受反作用力可直接反映镇压轮与地面的接触压力。基于此，本文选用轴销式应变传感器作为镇压力检测元件，并将其安装在镇压油缸与支架的连接销轴位置。为确保测量精度，传感器通过限位结构固定，避免随油缸转动而引起信号偏差。所采集的信号用于实时反馈镇压力变化，为闭环控制提供准确依据。

3 控制系统和液压系统设计

3.1 控制系统组成和控制策略

为实现播种过程中下压力与镇压力的精准调

控，构建了一套基于播种单体的压力闭环控制系统，如图 7 所示。系统采用 CAN 通信协议实现数据交互，用户可通过人机交互终端（硕博电子公司生产的 SPD－070－Ax 型触摸屏）输入目标压力值（下压力与镇压力，根据不同试验环境具体标定），控制器接收设定值后，通过比例控制策略驱动液压执行元件，同时将实时反馈参数返回终端，便于操作者根据作业状态动态调整。系统分别采用应变片＋放大板检测下压力、轴销传感器检测镇压力，传感器输出模拟电压信号经滤波处理后送入控制器，用于实时获取实际受力情况。

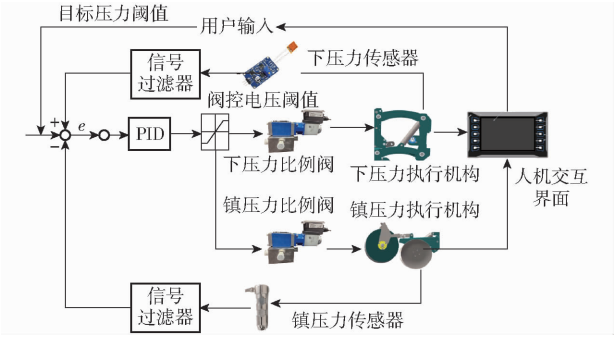


图 7　播种机单体控制系统原理图

Fig. 7　Schematic of single control system of seeder

系统控制器选用德国 HYDAC 公司生产的 HY－TTC 32 控制器，内部集成的 PID 控制算法，能对设定值与实际值进行动态比较并计算误差，输出相应控制信号至下压力与镇压力的电液比例阀，实现二者的调节控制。电液比例阀输出油压与控制电压呈线性关系，具有调节精度高、响应速度快等优点。液压缸作为最终执行元件，根据比例阀输出进行精确位移，从而稳定施加所需的压力值。系统结构具备良好的拓展能力，可根据播种机行数增设对应控制单元，实现播种单体的独立调控。

3.2　播种单体控制算法

控制器内部集成有一套具备前反馈补偿功能的 PID（比例−积分−微分）控制模块，其模拟电压控制逻辑遵循经典 PID 算法，即

$$V_{output}=\frac{K_{ff}}{10^3}D_d+\frac{K_p}{10^3}e+\frac{K_d}{10^4}\Delta e+\frac{K_i}{10^4}\sum e \quad (4)$$

式中　V_{output}——由 PID 控制器计算得到的模拟电压输出值，mV

D_d——设定的目标下压力，N

Δe——当前误差的微分值，用于反映误差变化趋势

e——目标值与实时反馈值之间的误差

$\sum e$——历史误差的积分值，用于衡量累计偏差

K_{ff}、K_p、K_i、K_d——前馈增益、比例增益、积分增益与微分增益，均可通过控制器内部的 PID 模块进行参数化调节

其中，播深目标值 D_d 的设定依据为 NY/T 1768—2009《免耕播种机质量评价技术规范》中推荐的播深范围（一般为 40 ~ 60 mm），并结合田间试验经验值确定（本研究设定为 50 mm）。该 PID 控制逻辑通过对误差及其变化量的综合计算实现对模拟输出的精细控制，不仅提升了系统对干扰的鲁棒性，也加快了响应速度。由于其调节精度高、适应性强，已在多种农业装备智能化控制场景中得到广泛应用。例如，玉米收获脱粒间隙自动控制系统[27]、电液下压力控制系统[13]、玉米脱粒装置进料速度和倾角自动控制系统[28]、玉米精量排种器电驱控制系统[29]等。

为验证控制系统对不同压力目标的调节能力，分别开展了下压力和镇压力的 PID 参数调试试验结果如图 8 所示。

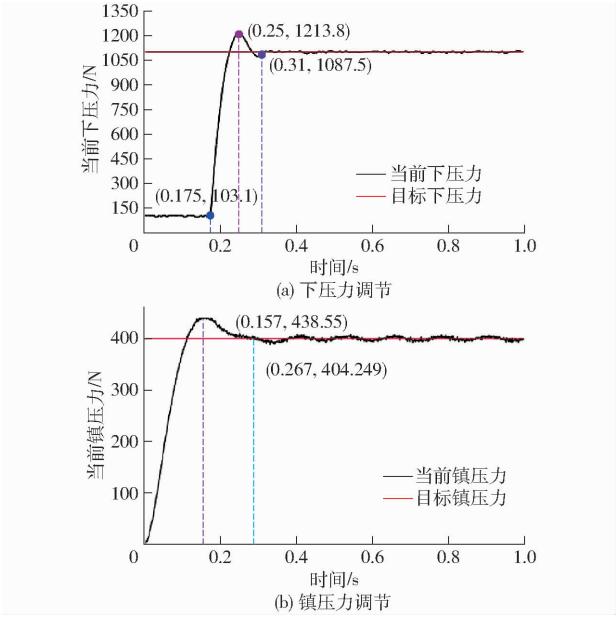


图 8　PID 调节系统响应曲线

Fig. 8　Response curves of PID control system

调试过程中，通过可视化界面实时观察控制效果，对比不同参数组合下的系统响应曲线，评估系统的响应时间、超调量及稳态性能。在不断调整控制参数的基础上，使下压力与镇压力在较短时间内分别达到目标值并趋于稳定。最终选取一组性能较优的参数配置作为控制器设定值：下压力调节中选取 $K_{ff}=2$、$K_p=550$、$K_i=74$、$K_d=600$；镇压力调节中选取 $K_{ff}=1.8$、$K_p=480$、$K_i=65$、$K_d=520$。

试验结果表明，调试后的系统在 0.31 s 内实现了下压力调节并稳定在目标值 1 200 N 附近，最大超

调量为 13.8 N,占目标值约 1.15%;镇压力系统在 0.267 s 内完成调节,最大超调量为 38.55 N,占比约 9.64%。调节后系统稳定性良好,满足实际作业需求。

3.3 液压系统设计

为实现下压力与镇压力的独立调控,设计了一套基于拖拉机液压输出的双回路液压系统(图 9)。系统以拖拉机液压接口为动力源,设置蓄能器、过滤器、手动减压阀、溢流阀等元件,实现油液缓冲、清洁及压力稳定。液压油经初步调压后进入先导式比例减压阀,由控制器输出的模拟电压信号调节出口压力,通过三位四通换向阀控制下压油缸和镇压油缸的动作,从而实现压力的动态调节。系统同时配备压力变送器、单向顺序阀、节流阀、液控单向阀和平衡回路等元件,用于实时监测和控制油液流向,防止负载下滑和液压冲击。

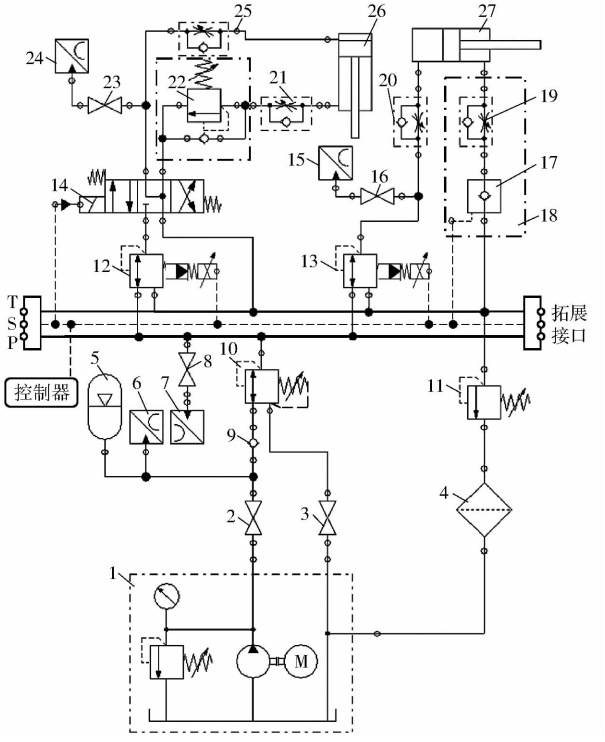


图 9 液压系统

Fig. 9 Hydraulic system composition

1. 拖拉机液压系统 2、3、8、16、23. 高压球阀 4. 过滤器 5. 蓄能器 6、7、15、24. 压力变送器 9. 单向阀 10. 手动减压阀 11. 溢流阀 12、13. 先导式比例减压阀 14. 三位四通换向阀 17. 液控单向阀 18. 平衡回路 19、20、21、25. 单向节流阀 22. 单向顺序阀 26. 下压油缸 27. 镇压油缸 P. 进油口 S. 控制信号 T. 回油口

先导式比例减压阀(力士乐 Rexroth 公司生产的 DRE6-1X 型电液比例减压阀)作为核心执行元件,依据控制器输出的模拟电压信号自动调节出口压力,实现对液压缸的连续控制。通过配置三位四通换向阀(北京华德液压公司生产的 5-WE10 型电磁换向阀),可灵活控制液压缸的进油和回油方向,支持双向动作,增强系统在不同作业场景下的适应能力。

下游回路中,设置单向顺序阀以控制液压油进入液压缸的顺序,该阀具备单向导通与顺序控制功能,在系统加载或卸载过程中防止伸缩杆突然滑落,有效抑制液压冲击与振动。同时,顺序阀起到平衡回路作用,维持压力稳定,确保播种作业中的下压力调节过程平稳、安全。

此外,系统设有标准化拓展接口,包括供油口(P)、回油口(T)和控制口(S),通过快速接头可实现多行播种单体的同步扩展,满足多行联控作业需求,提高整体系统的通用性与模块化水平。

4 试验与结果分析

4.1 传感器标定试验

4.1.1 试验台架搭建

为了明确压力传感器与下压力、镇压力之间的比例关系,从而实现下压力与镇压力的精准调节,需对下压力控制回路与镇压力控制回路分别进行试验标定,分别搭建了下压力(图 10a)与镇压力(图 10c)标定试验平台。在开展试验前,通过拖拉机的液压升降装置将播种单体整体抬升至合适高度,以便于将电子秤准确置于限深轮和镇压轮下方。考虑到播深设置对下压力测量结果存在影响,标定试验统一在 50 mm 作业播深条件下进行。



(a) 下压力标定 (b) 试验台架 (c) 镇压力标定

图 10 台架试验

Fig. 10 Test bench experiment

在下压力标定过程中,首先通过砖块将左右限深轮垫起一个高度,保证圆盘开沟器悬空不受力,在砖块下面摆好电子秤。随后缓慢升起播种单体,使限深轮手柄与限位块脱离接触。当限深轮刚好产生微小支撑力、电子秤显示微弱读数时,启动换向阀使下压油缸伸出,使播种单体逐渐下沉并将重力完全传递至电子秤,通过控制器内的数据保存功能,记录随油压增大,下压力检测传感器采集数据和电子秤读数的变化。镇压力标定则通过将电子秤放置于镇压轮下方,逐步增大控制镇压油缸的比例减压阀开度,读取传感器记录的数据与电子秤的读数。

整个标定过程中，通过电子秤分别获取限深轮支承力与镇压轮压力；显示终端同步显示并记录下压力与镇压力传感器的反馈值。试验过程中各通道数据均由采集系统实时记录，作为建立压力传感器与下压力和镇压力之间函数关系的依据。

4.1.2　下压力标定试验

以控制电压为试验变量，在设定播深为 50 mm 的典型工况下开展静态标定试验，测得传感器信号与下压力之间的定量关系。标定过程中，系统保持播深设定不变，限深轮臂与主机架间的 α 角恒定，避免因角度变化导致的非线性误差。将播种单体限深轮支撑于电子秤上，通过控制比例减压阀输入电压，使下压油缸缓慢推动播种单体逐步下沉。电子秤记录限深轮所受力值，控制器端同步采集应变式下压力传感器输出信号。

试验在 0 ~ 4 320 mV 区间共设置 25 个等间距控制电压点，分别进行电压递增与递减路径下的 3 次重复加载，并取平均。试验结果用于拟合传感器电压与下压力之间的线性关系，并利用 Matlab 绘制散点图，得到对应拟合曲线如图 11 所示。

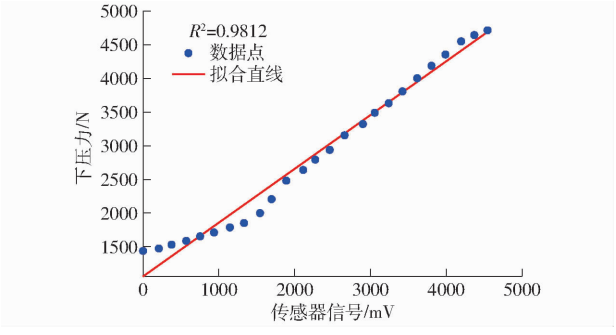


图 11　传感器信号与下压力标定拟合曲线

Fig. 11　Fitting curve of sensor signal and downward pressure calibration

得到传感器信号与下压力之间的关系式为

$$y = 0.798x + 1\,060.5 \tag{5}$$

式中　x——传感器信号，mV

y——下压力实际值，N

式(5)中的决定系数 R^2 为 0.981 2，有较高的拟合可信度，可以作为传感器信号与下压力之间的数学模型，从而可以根据下压力传感器的数据，得出下压力的具体数值，直接在显示屏上显示。

4.1.3　镇压力标定试验

在镇压力控制系统的试验过程中，由于镇压轮装置装配的预紧力不同，导致每行单体的初始镇压力存在一定差距，为了排除这一因素对镇压力标定的影响，在标定前，首先对每行单体镇压力调节手柄进行标定，标定结果如图 12 所示。

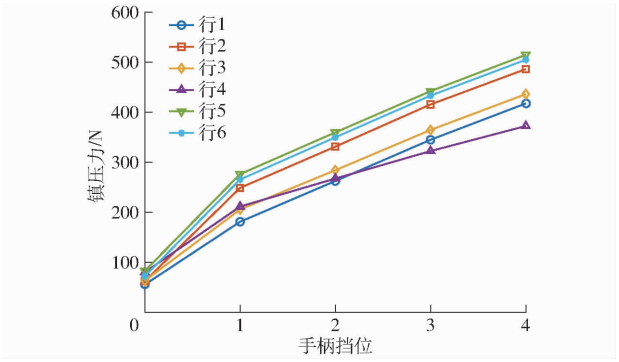


图 12　镇压力手柄标定

Fig. 12　Calibration of closing force handle

从图 12 可以看出，随着挡位的增加，和其他几行单体相比，第 4 行单体镇压力变化趋势有明显不同，因此标定时排除该行。通过对不同行标定试验数据进行线性拟合，建立了适用于多行的传感器电压输出与实际镇压力之间的函数关系模型，得到关系式

$$z = 0.688a + 83.3 \tag{6}$$

式中　z——镇压力实际值，N

a——镇压力传感器检测值，mV

式(6)中的决定系数 R^2 为 0.977 8，可为系统作业过程中镇压力目标值的设置提供依据，进而实现自动闭环调节与稳定控制。

4.2　田间试验

4.2.1　试验条件

为验证所设计电液控制系统在不同作业速度和土壤坚实度条件下对播深的调节性能，并与传统机械式播种单体进行对比，于 2025 年 4 月在山东省潍坊市诸城市进行田间试验。试验地块经过统一整地处理，确保各组试验具有一致的作业环境。

为构建不同土壤坚实度水平，对已耕地块分别进行压实处理，压实次数设为 0、3、5 次。使用土壤坚实度测试仪，在每块小区随机采集 20 个点，记录 50 mm 深度处的坚实度，取平均值作为该区土壤坚实度代表值。实测结果显示，3 种压实处理下土壤坚实度分别为 94 kPa(0 次)、485 kPa(3 次)和 654 kPa(5 次)。

为了评估不同播深调控方式在复杂作业条件下的稳定性，本研究同时对传统弹簧调节、下压力主动控制、下压力与镇压力双主动控制 3 种方式在不同作业速度下的播种性能进行了对比试验。

试验播种设备选用潍柴雷沃 2BMQE－6E 型六行气吸式玉米精量播种机，搭载课题组自研的气吸式电驱排种器，分别在其中 3 行安装基于电液控制的下压力和镇压力调节系统，另外 3 行保持原有机械式被动调节结构(图 13)。试验前，分别通过播深

调节手柄将播种单体的播深统一设定为 50 mm，以确保可比性。为研究系统在不同运行速度下的响应与稳定性，将试验地块划分为 3 个作业区，分别以速度 6、8、10 km/h 作业。



图 13 田间试验

Fig. 13 Field test

1. 控制器 2. 下压力比例阀 3. 下压油缸 4. 下压力传感器 5. 镇压力比例阀 6. 镇压力传感器 7. 镇压油缸 8. 覆土轮 9. 镇压轮

4.2.2 试验指标

为评估播种作业质量，参考 NY/T 1768—2009《免耕播种机质量评价技术规范》中相关评价方法，对实测播深数据进行统计分析，计算指标包括：平均播深、播深标准差、播深变异系数及播深合格率。依据该规范，播深合格范围设定为设定值 ± 10 mm，即播深在 40 ~ 60 mm 范围内的数据判定为合格值。播深数据获取如图 14。



图 14 试验数据获取

Fig. 14 Obtaining test data

4.2.3 试验结果与分析

根据图 15 所示，不同作业速度与压力调节方式下的播深变化曲线呈现出明显差异。总体来看，主动调节方式（单油缸、双油缸）下的播深数据大多数样本分布在设定值（50 ± 10）mm 的合格范围内，播深一致性良好，仅在个别点位出现轻微偏离。而采用弹簧调节方式时，播深波动幅度较大，部分样本低于 40 mm 或高于 60 mm，明显超出播深合格范围，播种一致性较差。随着作业速度的增加，各调节方式下播深波动均略有加剧，但主动调节方式仍表现出更高的播深稳定性和控制精度。

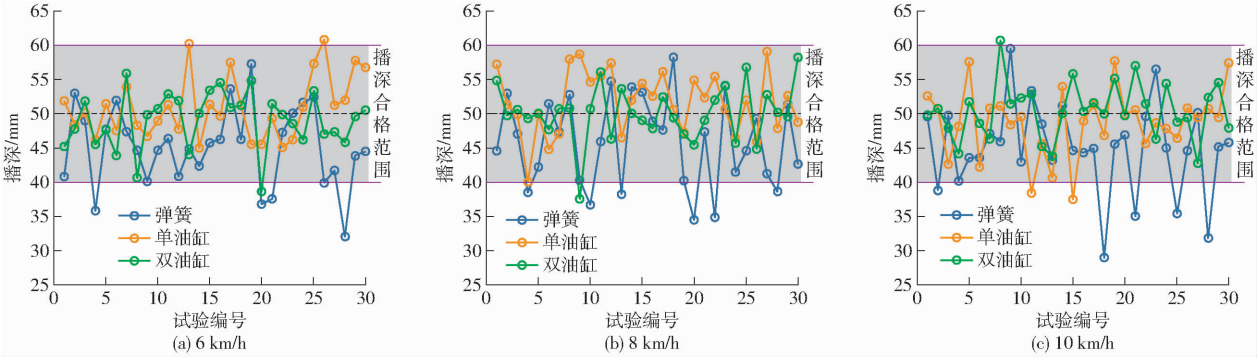


图 15 不同速度和压力调节方式下播深变化曲线

Fig. 15 Changing curves of seeding depth at different speeds and force adjusting way

表 3 展示了不同作业速度下，3 种播深调控方式的播种性能对比结果。

根据表 3 可知，随着作业速度由 6 km/h 增至 10 km/h，3 种调节方式下的播种深度平均值均呈下降趋势，尤其是弹簧调节方式下降幅度最大，反映出其对作业速度变化的适应性较差。相比之下，采用主动调节方式（单油缸、双油缸）系统的播深更加接近设定目标值，特别是双油缸调节系统，其播深始终稳定在 50 mm 左右，控制效果最优，表现出良好的速度适应能力。

从播种深度一致性指标来看，主动调节系统在各项性能上明显优于传统弹簧结构。双主动控制系统在不同作业速度下的播深合格率均保持在 96% 以上，播深标准差及变异系数亦为最低。在 10 km/h

表 3 播深测量统计结果

Tab. 3 Statistical results of sowing depth measurement

测定参数	调节方式	作业速度/(km·h^{-1})		
		6	8	10
播种深度平均值/mm	弹簧	45.22	45.84	45.06
	单油缸	50.85	51.70	48.73
	双油缸	49.04	50.11	50.46
播种深度合格率/%	弹簧	86.67	83.33	80.00
	单油缸	96.33	96.67	96.33
	双油缸	96.67	96.33	96.67
播种深度标准差/mm	弹簧	5.80	6.53	6.60
	单油缸	4.56	4.67	5.00
	双油缸	4.07	4.09	4.12
播种深度变异系数/%	弹簧	12.83	14.25	14.65
	单油缸	8.97	9.03	10.26
	双油缸	8.07	8.16	8.40

条件下，双油缸系统的变异系数仅为 8.4%，相比弹簧结构的 14.65% 降低显著，表明其在高速作业下仍具良好的播深稳定性与一致性。综上，主动调控系统能有效抑制因速度变化带来的播深波动，提升整体播种质量。

4.2.4　振动响应特性分析

为评估电液控制系统对播种作业中扰动的抑制能力，构建了采集系统并在田间同步记录播种单体的加速度信号。图 16 所示为加速度传感器安装位置及采集系统，传感器固定于播种单体机架水平部位，使用单轴加速度传感器与智能数据采集系统进行振动信号采集。

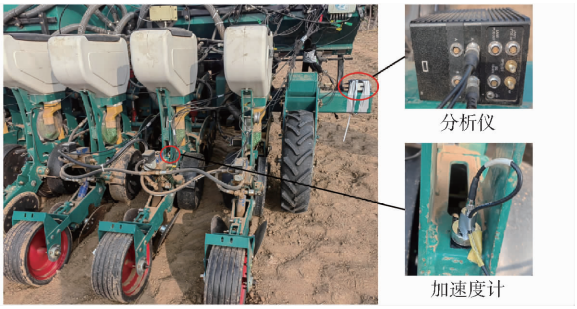


图 16　振动试验

Fig. 16　Vibration test

图 17 展示了在 6、8、10 km/h 3 种作业速度下，播种机采用主动控制与被动控制方式时的振动加速度时域响应情况。可以看出，随着作业速度增加，振动强度明显增强，波形扰动范围扩大；相较于被动控制方式，主动控制在各速度下均能有效抑制高幅值振动，有助于提升播种作业的稳定性与播深一致性。

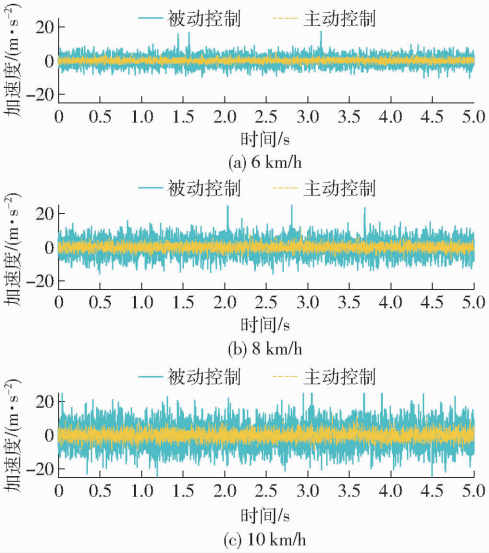


图 17　不同速度下主动控制与被动控制的振动加速度对比

Fig. 17　Comparison of vibration acceleration between active control and passive control at different speeds

为了量化振动控制效果，基于图 17 的加速度时域信号提取统计量，如表 4 所示。其中，均方根值（RMS）表征振动信号的平均能量水平，峰-峰值加速度（Peak-to-Peak）反映振动的最大幅值波动。

表 4　振动响应统计量

Tab. 4　Vibration response statistics

控制方式	作业速度/(km·h⁻¹)	均方根值/(m·s⁻²)	峰-峰值/(m·s⁻²)
被动控制	6	0.53	28.16
	8	0.67	36.74
	10	0.81	45.57
主动控制	6	0.28	17.61
	8	0.36	21.61
	10	0.44	27.42

进一步从频域角度分析（图 18）可知，各类振动信号的能量主要集中在 0～10 Hz 范围内，表明振动响应与地形起伏及作业系统自身激励频率存在显著耦合关系，具有典型的低频特征。尽管不同作业速度下频谱分布整体形态差异不大，但被动控制模式下各主频分量的幅值普遍较高，尤其在 10 km/h 条件下出现了明显的倍频激励现象，反映出系统在高速运行和高下压力作用下的频域响应增强。而主动控制方式则有效抑制了主频及倍频成分的能量幅值，使系统频谱能量分布更为均匀，频域扰动趋于收敛，进一步验证了主动控制策略对低频主激励的减振抑制能力。该特性对提升播种作业稳定性具有重要意义。

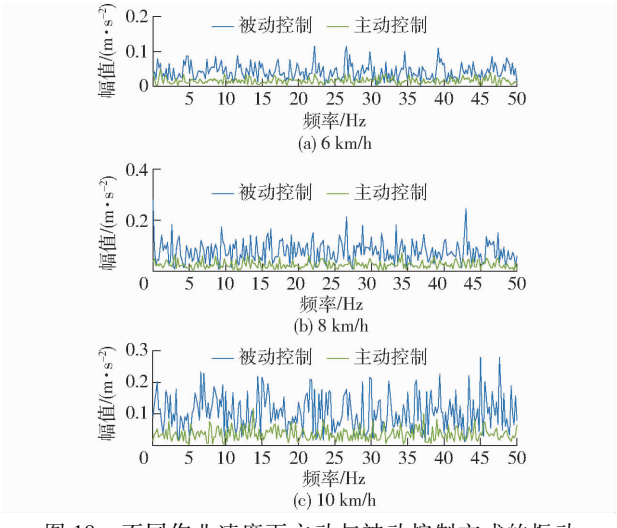


图 18　不同作业速度下主动与被动控制方式的振动频谱对比图

Fig. 18　Comparison of vibration spectra between active and passive control modes at different operating speeds

综上分析，电液主动控制系统在多种工况下均显著改善了播种单体的振动响应特性，尤其在高速度下表现出更优的频域能量抑制与时域幅值控制能力。该系统具备良好的动态响应性和环境适应性，有助于提高播种质量与播深一致性，适用于复杂田

间环境下的精量播种作业。

5 结论

(1)针对玉米播种作业中播深不稳定、抗扰动能力弱等问题,设计了一种下压力与镇压力联合调节的电液控制系统。系统通过电液比例阀实时调节作用力,实现播种单体对田间复杂地况的快速响应与稳定控制。

(2)田间试验结果表明:在 6 ~ 10 km/h 作业速度下,与传统被动弹簧调节装置相比,所提出的主动控制系统显著降低了播深波动幅度和振动响应强度。最大播深变异系数降低 6.25%;振动均方根值(RMS)平均下降 46.3%,峰-峰值下降 39.6%,验证了该系统优越的抗扰动能力和作业稳定性。

(3)播种单体振动能量主要集中于 0 ~ 10 Hz 区间,呈典型低频激励特征。主动控制模式下,系统显著削弱了主频与倍频分量的幅值响应,使振动频谱更平滑,体现出良好的频域控制能力和抗扰性能。

(4)设计的电液控制系统具备高响应、高适应性、高稳定性,能够有效应对播种作业中由地形起伏、残茬干扰和结构间隙等因素带来的扰动,为保障播深一致性和提升播种质量提供了技术支撑。

参 考 文 献

[1] 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 of precision maize seeding technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38 - 48. (in Chinese)

[2] KIRKEGAARD NIELSEN S, MUNKHOLM L J, LAMANDÉ M, et al. Seed drill depth control system for precision seeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 174 - 180.

[3] NIELSEN S K, NØRREMARK M, GREEN O. Sensor and control for consistent seed drill coulter depth[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 690 - 698.

[4] 曹慧英, 王丁波, 史建国, 等. 播种深度对夏玉米幼苗性状和根系特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2397 - 2404.
CAO Huiying, WANG Dingbo, SHI Jianguo, et al. Effects of seeding depth on seedling traits and root characteristics of summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015, 26(8): 2397 - 2404. (in Chinese)

[5] 曹慧英, 史建国, 朱昆仑, 等. 播种深度对夏玉米冠层结构及光合特性的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(1): 102 - 109.
CAO Huiying, SHI Jianguo, ZHU Kunlun, et al. Effects of seeding depth on canopy structure and photosynthetic characteristics of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(1): 102 - 109. (in Chinese)

[6] 衣淑娟, 李怡凯. 主动仿形技术研究现状与展望[J]. 中国农机装备, 2023(9): 2 - 7.
YI Shujuan, LI Yikai. Research status and prospect of active profiling technology[J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2023(9): 2 - 7. (in Chinese)

[7] 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 seeding depth and press intensity on maize emergence rate under total straw crushing and plowing returning conditions[J]. Northeast Agricultural Sciences, 2018, 43(6): 16 - 19. (in Chinese)

[8] 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 pressing device for hilly areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017, 48(4): 82 - 89. (in Chinese)

[9] LI H, HE J, WANG Q, et al. Analysis of slope-adaptive in covering-compacting device for no-till sowing based on DEM - MBD[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 233: 110175.

[10] 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, 315.
JIA Honglei, GUO Hui, GUO Mingzhuo, et al. Finite element simulation and experiment of elastic soil-covering press wheel for inter-row tillage seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 9 - 16, 315. (in Chinese)

[11] 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. Precise control of pressing force for no-tillage seeders[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(10): 141 - 148. (in Chinese)

[12] 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 1): 62 - 68, 42.
LI Yuhuan, MENG Pengxiang, GENG Duanyang, et al. Research on intelligent control system for maize seeding depth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp. 1): 62 - 68, 42. (in Chinese)

[13] JING H, ZHANG D, WANG Y, et al. Development and performance evaluation of an electro-hydraulic downforce control system for planter row unit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172: 105073.

[14] 赵慧慧. 播种单体下压力智能决策与控制系统研究[D]. 北京:中国农业大学,2023.

ZHAO Huihui. Research on intelligent decision-making and control system of downforce for seeder unit[D]. Beijing: China Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[15] 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. Seeding depth control system for no-tillage seeders based on piezoelectric film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 1-8. (in Chinese)

[16] 高原源, 翟长远, 杨硕, 等. 播种单体对地下压力测量方法和数学模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 1-9.
GAO Yuanyuan, ZHAI Changyuan, YANG Shuo, et al. Underground pressure measurement method and mathematical model for seeding unit[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 1-9. (in Chinese)

[17] 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 experiment of integrated control system for seeding depth and compaction of maize planters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 61-72. (in Chinese)

[18] 夏徐隆. 玉米播种机半独立式覆土镇压装置设计与试验[D]. 北京: 中国农业大学, 2023.
XIA Xulong. Design and experiment of semi-independent soil covering and pressing device for maize planter[D]. Beijing: China Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[19] NIELSEN S K, MUNKHOLM L J, LAMANDE M, et al. Seed drill depth control system for precision seeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 174-180.

[20] VIRK S S, PORTER W M, LI C, et al. On-farm evaluation of planter downforce in varying soil textures within grower fields [J]. Precision Agriculture, 2020, 21(6): 1072-1090.

[21] BAI H J, LI S, FAN X Q, et al. Research on pressure regulation performance of electro-hydraulic control system of planter in field[C]// ASABE Annual International Meeting, Omaha, Nebraska, 2020.

[22] CHANGYUAN Z, LONG J, TAYLOR R, et al. Field scale row unit vibration affecting planting quality[J]. Precision Agriculture, 2020, 21(3): 589-602.

[23] 王奇, 朱龙图, 李名伟, 等. 指夹式玉米免耕精密播种机振动特性及对排种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 9-18.
WANG Qi, ZHU Longtu, LI Mingwei, et al. Vibration characteristics of finger-clamp type no-tillage precision maize planter and its influence on seeding performance[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 9-18. (in Chinese)

[24] WEN C, ZHANG J, ZHENG K, et al. Accelerated verification method for the reliability of the motor drive mechanism of the corn precision seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 108163.

[25] CHANGYUAN Z, LONG J, TAYLOR R, et al. Field scale row unit vibration affecting planting quality[J]. Precision Agriculture, 2020, 21(3): 589-602.

[26] 张晓冬, 李成华, 李建桥, 等. 铲式玉米精密播种机振动特性模型建立与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 88-93.
ZHANG Xiaodong, LI Chenghua, LI Jianqiao, et al. Establishment and experiment of vibration model for shovel-type precision maize planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 88-93. (in Chinese)

[27] FAN C, ZHANG D, YANG L, et al. Power consumption and performance of a maize thresher with automatic gap control based on feed rate monitoring[J]. Biosystems Engineering, 2022, 216: 147-164.

[28] FAN C, ZHANG D, YANG L, et al. Development and performance evaluation of a guide vane inclination automatic control system for corn threshing unit based on feedrate monitoring[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106745.

[29] HE X, CUI T, ZHANG D, et al. Development of an electric-driven control system for a precision planter based on a closed-loop PID algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 136: 184-192.