doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.004

马铃薯播种机株距精量控制系统设计与试验

毛　旭[1,2]　汪　达[1]　于博杰[1]　李　好[1]　李　洋[3]　杨德秋[3]　谭　彧[1]

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 智能农业动力装备全国重点实验室, 北京 100083;
3. 中机美诺科技股份有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对传统地轮驱动马铃薯播种机株距调节能力有限及高速滑移导致播种精度低、均匀性差等问题,研发了一套基于电液驱动的马铃薯播种机株距精量控制系统。系统采用液压马达驱动替代地轮机械传动,基于双油路液压集成阀块实现 2 路播种单元独立调控;设计了模糊 PID 控制器,依据行驶速度与液压马达转速双反馈构建闭环调速系统,根据偏差(e)和偏差变化率(e_c)动态调节 PID 参数,显著提升株距均匀性与无级调节能力。AMESim - Simulink 联合仿真结果表明:在阶跃信号(70 r/min)和突加负载(100 N·m)工况下,双马达同步性良好(无超调),响应时间小于 0.5 s,转速波动幅度小于 1.5%,并于 0.3 s 内收敛。室内台架与田间试验结果表明:在株距 0.16 ~ 0.24 m 及速度 2 ~ 8 km/h 工况下,实际播种株距相对偏差不大于 8%,符合行业标准,满足多工况下精量播种的高可靠性要求。

关键词: 马铃薯播种机; 电液驱动; 模糊 PID 控制; 株距精量控制

中图分类号: S223.2⁺3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)04-0028-10　　**OSID**:

Precision Planting Control System for Electro-hydraulic Driven Potato Planter with Regard to Planting Distance

MAO Xu[1,2]　WANG Da[1]　YU Bojie[1]　LI Hao[1]　LI Yang[3]　YANG Deqiu[3]　TAN Yu[1]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment*, *Beijing* 100083, *China*
3. *MENOBLE Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming to address the limitations in plant spacing adjustment capability and the issues of low seeding precision and poor uniformity caused by high-speed slippage in traditional ground-wheel-driven potato planters, an intelligent precision seeding control system for potatoes was developed. The system replaced the mechanical ground-wheel drive with a hydraulic motor drive, achieving independent control of two seeding units through a dual-circuit hydraulic integrated valve block. A PLC controller integrating a fuzzy PID algorithm was developed, establishing a closed-loop speed regulation system based on dual feedback signals from the travel speed and hydraulic motor speed. Parameters were dynamically adjusted according to the error value (e) and the error change rate (e_c), significantly enhancing plant spacing uniformity and enabling stepless adjustment capability. AMESim - Simulink co-simulation results demonstrated that: under step signal input (70 r/min) and sudden load application (100 N·m) conditions, the system exhibited excellent synchronization between the dual motors (with no overshoot), a response time under 0.5 s, and a rotational speed fluctuation amplitude below 1.5%, converging within 0.3 s. Laboratory bench tests and field trials indicated that: across a plant spacing range of 0.16 ~ 0.24 m and operational speeds of 2 ~ 8 km/h, the actual seeding plant spacing exhibited a relative deviation not exceeding 8%, with a qualification rate reaching or exceeding 92%. These performance metrics complied with relevant industry standards and fulfilled the high-reliability requirements for precision seeding under diverse operating conditions.

Key words: potato planter; electro-hydraulic drive; fuzzy PID control; precise spacing control

收稿日期: 2025 - 09 - 29　修回日期: 2025 - 10 - 22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2000902)和国家自然科学基金项目(32201687)

作者简介: 毛旭(1988—),男,副教授,博士,主要从事智能农业装备与农业无损检测技术研究,E-mail: maoxu@cau.edu.cn

0　引言

马铃薯作为世界第四大主粮，兼具粮食安全、饲料、鲜食与加工等多重功能，经济价值显著[1]。中国马铃薯产量与种植面积虽居世界首位，然而，我国马铃薯的平均单产仅为 16 t/hm^2，比世界平均水平低 2 t/hm^2，产业竞争力不强[2-4]。当前，国际产业向精量化、系统化发展，而国内机械化与智能化水平不足制约了规模化进程[5]。现有主流勺带式马铃薯播种机存在明显缺陷：因地轮滑移和拖拉机速度不稳导致株距不均，影响产量；且株距调节依赖手动更换链轮，需停机操作，效率低、劳动强度大[6-10]。因此，亟需研发一种马铃薯播种机自适应智能播种控制系统，取代传统驱动方式，实现精准、高效播种，推动产业升级。

马铃薯播种机是实现高效种植的核心装备[11]，其驱动方式与控制方法是技术关键。国外发达国家在此领域研究较早，已经使用电液驱动，如德国格立莫(GRIMME)公司的 GL 420 Exacta 型播种机[12]、美国 Double L 公司的 9540 系列播种机[13]。国内大部分常用的马铃薯播种机仍采用地轮驱动，如中机美诺 1240A 型播种机在播种过程需要人为干预[14]，且在高速播种过程，由于地轮的巨大滑移，造成株距误差明显增大[15]。国内马铃薯播种机工作效率和播种质量相比于国外先进机型有很大提升空间。

精准农业旨在通过先进技术实现农业生产的高效与精准[16]，而株距调节作为播种环节的关键技术，是实现精准农业目标的重要手段。John Deere 公司研发的 1795 型播种机以液压马达驱动排种器主轴，通过比例流量控制阀实时调节转速，提升株距精度[17]。大多数通过建立播种机内薯种运动特性的模型并使用电液驱动进行株距调节[18]。但国内马铃薯播种机普遍使用机械式链条传动方式，无法满足株距宽范围无级调节。

综上所述，国内马铃薯播种机目前仍以机械优化为主，驱动方式为传统的地轮驱动，限制了播种机的株距调节范围和播种精度。为提升国内马铃薯播种机的整体性能，需要突破传统地轮驱动方式，以实现无级调节，提升播种株距可调节范围，整体提升株距均匀性以及播种精度。

基于此，本文基于电液驱动设计株距精量自适应智能播种控制系统，以电液驱动取代地轮驱动。设计液压驱动系统，并开发电液控制系统，以实现对播种机作业过程的株距精确控制，开发控制算法，进一步优化播种作业的精度与效率。开展室内台架与田间试验，验证系统性能的稳定性和可靠性，评估播种机在实际工况下作业效果，为提升马铃薯播种机智能化水平提供技术支持。

1　电液驱动播种机结构与工作原理

马铃薯播种机主要结构如图 1 所示，包括种箱装置、地轮装置、培土圆盘装置、播种单体、播种开沟部件、液压马达等。

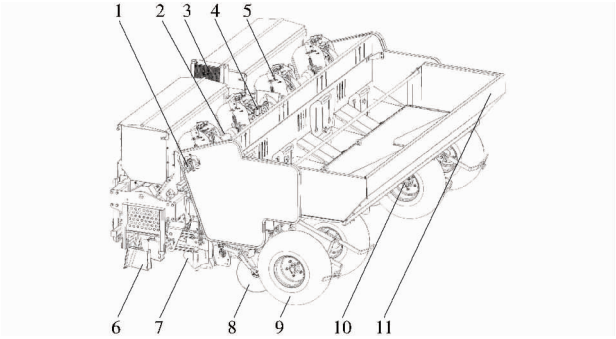

图 1　电液驱动马铃薯播种机结构与工作原理

Fig. 1　Structural and operational principles of electro-hydraulic potato planter

1. 液压马达　2. 排种轴　3. 散热风箱　4. 集成阀块　5. 播种单体　6. 施肥开沟部件　7. 播种开沟部件　8. 培土圆盘装置　9. 地轮装置　10. 编码器　11. 种箱装置

在播种机中间 2 个播种单体上方设计可拆卸支撑架，用其固定液压集成阀块；每个播种单体右侧设计液压马达固定架，用联轴器将液压马达和排种轴相连；1 个液压马达控制 2 个播种单体；每 2 个播种单体之间有可拆卸的隔板，将种箱隔开，便于对每 1 个播种单体进行控制，实现精量播种。播种机主要参数如表 1 所示。

表 1　马铃薯播种机主要参数

Tab. 1　Main parameters of potato planter

参数	数值
整机质量/kg	2 600
外形尺寸/(mm × mm × mm)	2 600 × 3 900 × 2 000
配备功率/kW	≥103
载种量/kg	1 500
载肥量/kg	750
工作行距/mm	900
种植行数/行	4

播种机与拖拉机配套，可一次性完成开沟、播种和培土(种床)等作业。电液驱动播种机利用拖拉机的液压泵提供动力，当液压油达到设定压力后进入回路。控制器根据播种机前进速度和株距-转速决策模型，计算出液压马达目标转速，并通过调节电液比例流量阀开度控制液压马达流量，实现排种轴转速控制。转速传感器实时反馈

排种轴转速,控制器据此动态调整比例流量阀开度,实现转速闭环控制。排种轴带动杯式播种单体匀速作业,实现种薯定量等距播种。培土圆盘完成培土起垄。

2 液压驱动系统设计

2.1 液压系统设计与关键参数

2.1.1 液压系统总体设计

采用 2 套独立液压马达驱动播种单体的方案,设计液压系统原理如图 2 所示,主要由液压泵、溢流阀、优先型压力补偿三通比例流量控制阀、单向阀及液压马达构成。系统压力随马达最大负载压力自适应变化,并与最大负载压力保持恒定压差,从而抑制负载波动对比例阀输出流量的影响。单向阀可在马达制动时向进油口补油,防止油路产生真空度。所设计的液压调速回路能够实现 2 路播种单元的转速独立控制。

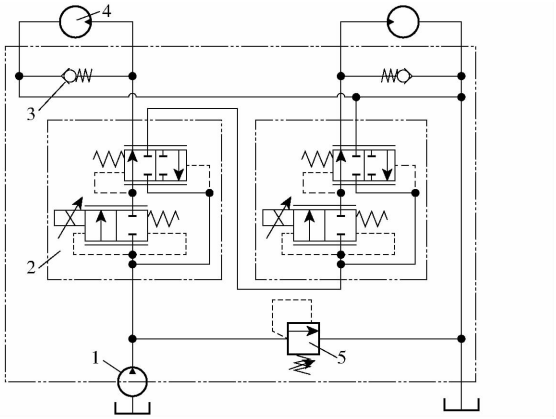

图 2 液压系统原理图

Fig. 2 Hydraulic system schematic

1. 液压泵 2. 优先型压力补偿三通比例流量控制阀 3. 单向阀 4. 液压马达 5. 溢流阀

2.1.2 液压马达相关参数计算

马铃薯播种作业时,播种机由拖拉机牵引前进,播种单元通过液压马达驱动排种轴,进而带动薯种输送带运转。采用的原型机是中机美诺科技股份有限公司 1240B 型马铃薯播种机,相邻薯种勺距离 65 mm,主动轮直径 285 mm,株距 140 ~ 420 mm,播种机前进速度 1.11 ~ 2.22 m/s,计算可得排种轴转速为 12 ~ 69 r/min。由于液压马达和排种轴相连,传动比为 1∶1,所以液压马达转速和排种轴转速一致,因此液压马达转速 n_m 为 10 ~ 70 r/min。

液压马达转矩与薯种输送带运行时负载有关,计算公式为

$$T_m = F_m \frac{r_{zd}}{\eta_m} \tag{1}$$

式中 T_m——液压马达输出转矩,N·m

F_m——薯种输送带工作时负载,N

r_{zd}——薯种输送带主动轮半径,mm

η_m——机械效率,取 0.95

通过测试可知,薯种输送带正常工作时负载为 300 N。薯种输送带主动轮半径为 142.5 mm,代入式(1)得到液压马达输出转矩为 90 N·m。

农业机械中液压系统工作压力通常为 10 ~ 16 MPa[19]。选定系统工作压力 p 为 10 MPa。液压马达输入排量与液压马达流量计算公式为

$$V = \frac{2\pi T_m}{p\eta_m} \tag{2}$$

$$Q_m = \frac{n_m V}{1\,000}\eta_v \tag{3}$$

式中 V——马达排量,mL/r

η_v——马达容积效率,取 0.80 ~ 0.95

Q_m——马达输入流量,L/min

计算可得液压马达排量为 70.65 mL/r,液压马达最大输入流量 Q_m 为 4.95 L/min。由于需给 2 个液压马达供油,所以液压泵输出总流量为 9.9 L/min。

常用于马铃薯 4 行播种机的拖拉机,其配套的液压泵额定流量通常是 40 ~ 60 L/min,远大于设计需要的液压泵流量,因此该液压泵可以作为液压系统动力源。考虑能量损失以及后续可能提高播种速度的要求,最终选定 BMR80 型液压马达,其排量为 80.5 mL/r。

2.2 液压系统集成阀块设计

由于马铃薯播种机安装空间有限,传统的管路连接方式安装困难、妨碍操作。因此,采用液压集成阀块方案,可以节省空间以及提升系统的稳定性。集成阀块的孔径尺寸选取合理能够确保油液流通的顺畅,有效控制流速、压力损失和系统的响应速度。集成阀块油道孔径计算公式为

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{v\pi}} \tag{4}$$

式中 d——阀块油道孔径,mm

v——阀块油道油液流速,m/s

Q——阀块油道油液流量,L/min

在液压系统中,管路流速为 2.5 ~ 6 m/s[20]。取流速为 6 m/s,计算得到油路孔径最小值 d 为 7.75 mm,为加工方便统一取油道孔径为 10 mm。

根据液压系统实际工作压力,选用铝合金作为集成阀块材料,并对阀体表面进行阳极氧化处理,防止阀体锈蚀。集成阀块壁厚直接关系到阀块在液压系统中的强度和安全性[21],合理的壁厚能够确保阀块在高压环境下不发生变形,保证系统稳定运行。

油道壁厚计算式为

$$\delta \geqslant \frac{p_m dn}{2\sigma_y} \tag{5}$$

式中　δ——阀块油道间壁厚，mm

n——安全系数，取 4

p_m——最高工作压力，MPa

σ_y——材料屈服强度，MPa

集成阀块选取 6061－T6 铝合金材料，屈服强度为 276 MPa，由此计算可得阀块最小壁厚 δ 为 0.9 mm。

阀块内部流道通常纵横交错，需连接多个阀和油口。通过综合考虑各个液压元件的功能以及液压集成阀块安装位置，将液压集成阀块设计为长方体，三维设计图呈现出流道的立体路径。进油口、出油口和单向阀 1 设置在液压阀块左面，马达进出油口设置在液压阀块正面，单向阀 2 设置在液压阀块右面，顶部为电液比例质量阀和溢流阀，底部设置固定螺栓安装位置，其他工艺孔用螺堵封死。设计完成的液压集成阀块如图 3 所示。

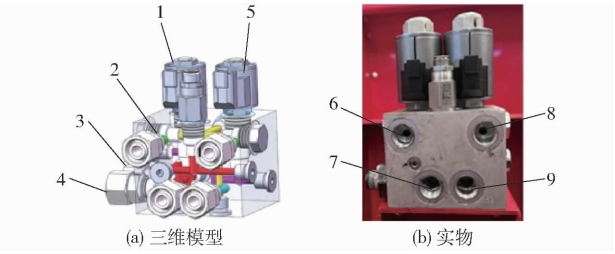

图 3　液压集成阀块

Fig. 3　Hydraulic integrated valve block

1. 电液比例流量阀　2. 单向阀　3. P 进油口　4. T 出油口　5. 溢流阀　6.1 号马达进油口　7.1 号马达出油口　8.2 号马达出油口　9.2 号马达进油口

2.3　电液控制系统集成

电液控制系统主体为 PLC 集成模糊 PID 算法的控制器，其硬件部分主要包括 4 大模块：控制器、信号放大模块、数据采集模块、执行模块和辅助模块，如图 4 所示。

控制器选用西门子 S7－1200 PLC，其具有集成的 PID 功能模块和模拟量输入输出模块、I/O 模块，并支持 PROFINET 通信协议，适用于复杂的液压控制场景。采用欧姆龙 E6B2－C 增量式编码器，采集播种机前进速度和液压马达转速的双反馈信号。这种双反馈机制对于自适应控制至关重要，控制器可实时获取实际速度和排种转速，而非依赖于假设的地轮速度。执行模块则通过 ET－M1－D24－2A－A 比例放大器，将 PLC 输出信号精确放大，驱动电液比例流量阀进行流量调节。

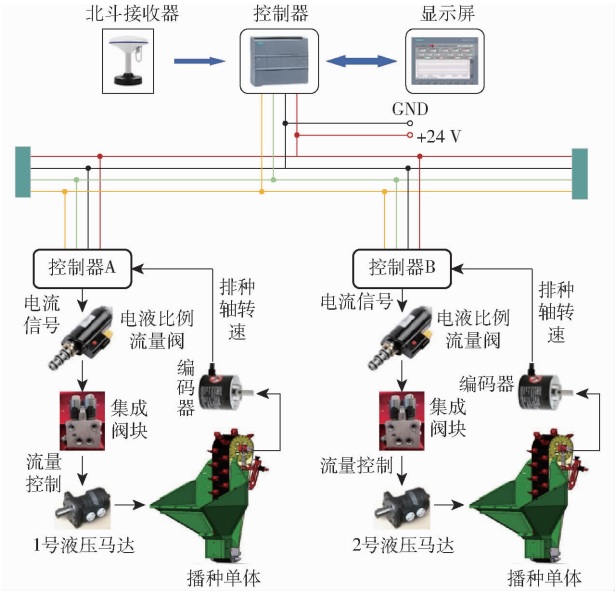

图 4　控制系统组成

Fig. 4　Control system schematic

3　马铃薯播种机电液控制策略及仿真

3.1　液压驱动系统仿真

3.1.1　单马达液压系统建模

使用 AMESim 软件建立马铃薯播种机电液驱动油路模型，对其进行仿真分析。采用 AMESim 中 HCD（Hydraulic component design）库通过参数化模块构建自定义液压元件的物理模型，可获得比选用标准液压库更佳的试验数据兼容性[22]。完成电液比例阀建模后，根据设计的液压系统原理图搭建单个马达液压调速回路仿真模型，如图 5 所示。

3.1.2　模型仿真结果分析

马铃薯播种机播种作业时，种箱连续补种，液压马达外负载维持在 90 N·m 左右波动。因此在仿真时将液压马达负载转矩设置为 90 N·m，液压马达转速设为 70 r/min，得到液压马达流量以及转速仿真曲线，如图 6 所示。

由图 6 可知，系统启动后约 0.33 s，液压马达流量与转速同步达到峰值，存在超调量 1.7%；约 0.7 s 后系统趋于稳定，转速维持在设定值（70 r/min）附近，说明电液比例流量阀响应迅速、控制有效。为进一步验证系统在速度波动下调节性能，开展了线性转速信号仿真（图 6c、6d）。在工作区间 10～70 r/min 内，马达转速随比例流量阀同步变化，控制趋势一致，未出现明显失调，表明该系统能够克服地轮滑移与车速波动的影响，实现对液压马达转速的稳定控制。

3.1.3　双马达液压系统建模与仿真

基于图 2 所示的液压系统原理图，建立相应的

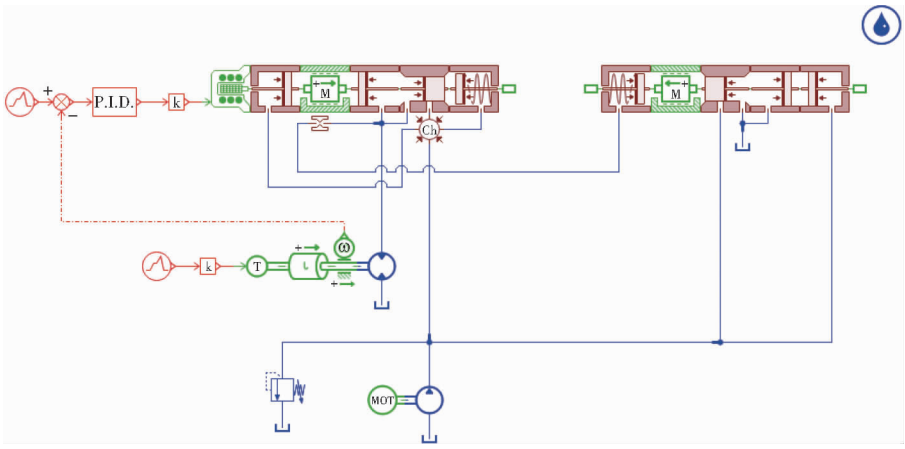

图 5 单马达液压调速回路模型

Fig. 5 Simulation model of single motor hydraulic speed regulation circuit

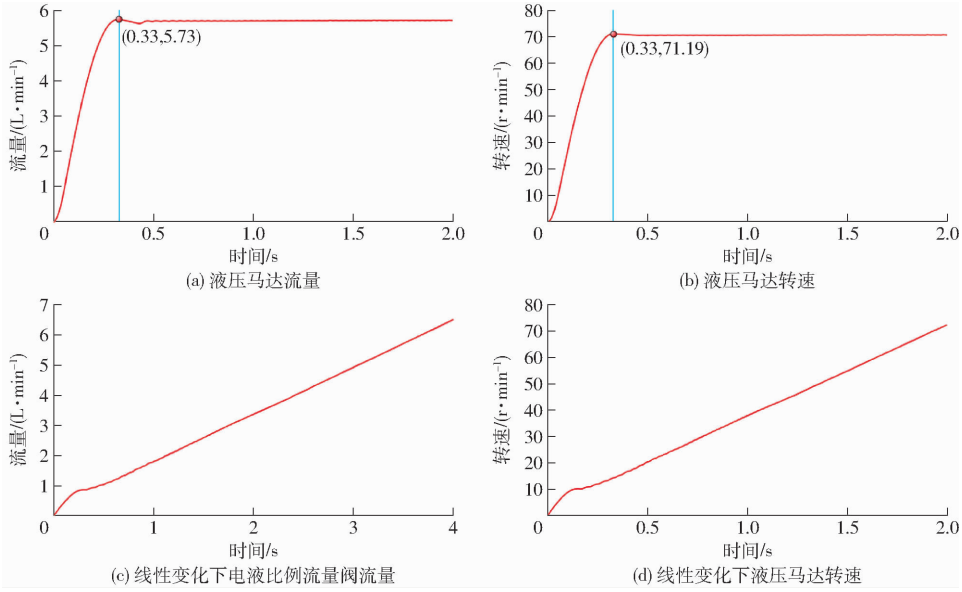

图 6 仿真结果

Fig. 6 Simulation result

双马达驱动模型,如图 7 所示。仿真所得的双回路液压马达转速响应曲线如图 8 所示,结果表明,1 号液压马达超调量为 5.3%,2 号液压马达超调量为 3.4%。系统达到稳态后,2 路液压马达的转速高度一致。这表明液压系统中,2 个液压马达具有良好的同步性能,系统对二者的转速控制表现出较高的一致性,且稳态转速误差较小。

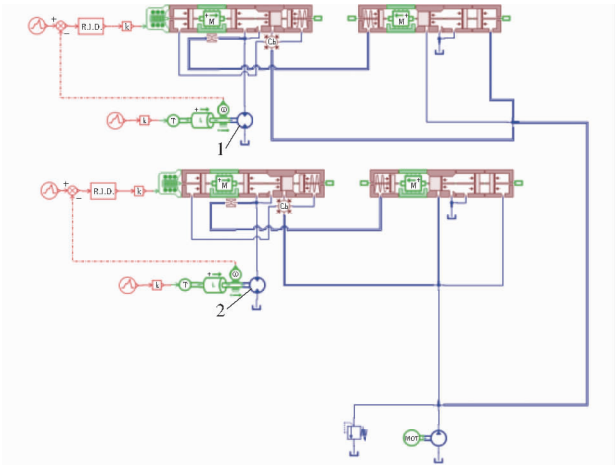

图 7 双液压马达驱动系统仿真模型

Fig. 7 Simulation model of dual-circuit hydraulic motor drive system

1.1 号液压马达 2.2 号液压马达

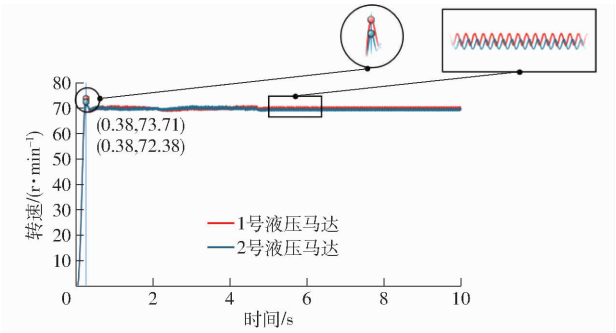

图 8 双马达驱动转速曲线

Fig. 8 Dual-circuit motor speed curve

3.2　电液控制系统控制器设计

3.2.1　模糊 PID 控制算法

采用模糊 PID 控制作为控制策略，当系统出现波动时，通过模糊 PID 控制器动态调节 K_P、K_I、K_D 3 个参数，及时给出调整，提升控制准确性，模糊 PID 控制器结构如图 9 所示。图中，$r(t)$ 表示被控变量理想输入值，$c(t)$ 表示被控对象实际输出值，e 表示 $r(t)$ 和 $c(t)$ 偏差，$e = r(t) - c(t)$，e_c 表示偏差变化率，ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 表示 PID 控制器的调整参数，而 $u(t)$ 表示模糊 PID 控制器输出值，虚线框架内则是模糊控制规则[23]。

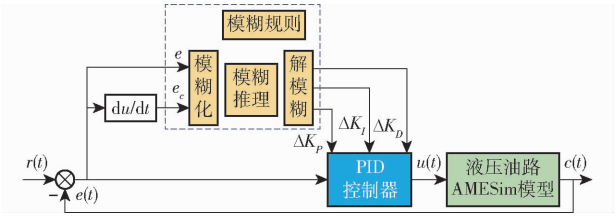

图 9　模糊 PID 控制器结构

Fig. 9　Structure of fuzzy PID controller

模糊 PID 控制流程[24]为：

(1)模糊控制器输入为被控变量偏差 e 和偏差变化率 e_c。

(2)输入信号给到模糊控制器后，经过模糊化处理，得到 e 和 e_c 分属不同模糊集的隶属度，据此使用所设计的模糊规则便可开展模糊推理得到输出变量 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 的模糊结果。

(3)将得到的模糊结果进行去模糊化处理得到输出变量的精确数值。

(4)得到 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 3 个参数，由此对 PID 控制器参数 K_P、K_I 及 K_D 分别进行调整，公式为

$$\begin{cases} K_P = K_{P0} + \Delta K_P \\ K_I = K_{I0} + \Delta K_I \\ K_D = K_{D0} + \Delta K_D \end{cases} \tag{6}$$

式中　K_{P0}、K_{I0}、K_{D0}——PID 控制器参数初始值

最终模糊 PID 输出为

$$u(t) = K_P e + K_I \int_0^t e\mathrm{d}t + K_D \frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t} =$$

$$(K_{P0} + \Delta K_P)e + (K_{I0} + \Delta K_I)\int_0^t e\mathrm{d}t + (K_{D0} + \Delta K_D)\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t} =$$

$$\left(K_{P0}e + K_{I0}\int_0^t e\mathrm{d}t + K_{D0}\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}\right) +$$

$$\left(\Delta K_P e + \Delta K_I \int_0^t e\mathrm{d}t + \Delta K_D \frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}\right) \tag{7}$$

3.2.2　模糊 PID 控制器设计

针对电液比例阀控制马达系统，设计模糊 PID 控制器。将速度偏差 e、偏差变化率 e_c 及控制参数 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 的模糊集均定义为 7 个级别：{NB，NM，NS，ZO，PS，PM，PB}。输出变量 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 的基本论域分别设定在(−0.02，0.02)、(−0.02，0.02)及(−0.01，0.01)，控制策略见表 2。

表 2　模糊 PID 算法参数规则

Tab. 2　Rules of fuzzy PID algorithm

参数	e_c	e						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ΔK_P	NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
	NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZO	NS
	NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
	PS	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
	PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB
ΔK_I	NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	PS
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PS	PM
	PS	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
	PM	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PB	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
ΔK_D	NB	PS	NS	NB	NM	NB	NM	NS
	NM	PS	NS	NB	NM	NS	ZO	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NS	NS	ZO	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	ZO	ZO
	PS	PS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	PM	ZO	ZO	ZO	ZO	PS	PS	PS
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PS

为兼顾系统稳定性与动态响应性能，采用高斯型与三角形相结合的隶属度函数，并基于 Mamdani 模糊推理方法，运用“最大−最小”合成规则及面积重心法进行去模糊化。该方法在保持稳态区域连续性的同时，有效抑制超调，并通过规则快速切换提升中间状态的调节灵敏度，从而在复杂非线性系统中实现响应速度与抗扰能力的平衡。基于上述设计，在 Simulink 中搭建模糊控制器并生成输出曲面及隶属度函数曲线，结果如图 10 所示。

图 10 中模糊控制曲面不存在断面的情况，说明所设计的控制器能呈现出较好的控制连续性，不会出现去模糊化错误的情况。

3.2.3　控制系统联合建模与仿真

为验证所设计模糊 PID 控制器的实际工况适应性与稳定性，开展电液控制系统仿真。基于 AMESim − Simulink 联合仿真模型[25]，搭建液压驱动系统与控制器模型协同仿真接口如图 11 所示，实现液压系统与控制算法动态耦合仿真。

基于所构建的 AMESim − Simulink 联合仿真模型，对电液控制系统在典型作业扰动下的动态性能进行验证。通过分别施加阶跃转速信号与突加负载

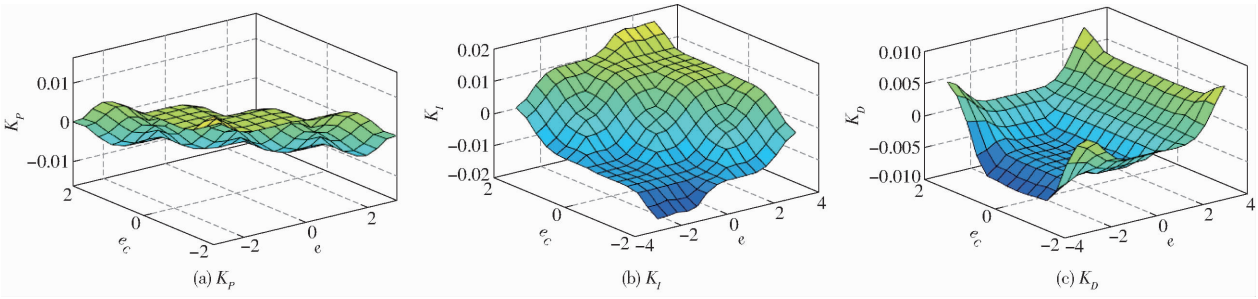

图 10 模糊控制输出曲面

Fig. 10 Fuzzy control output surface

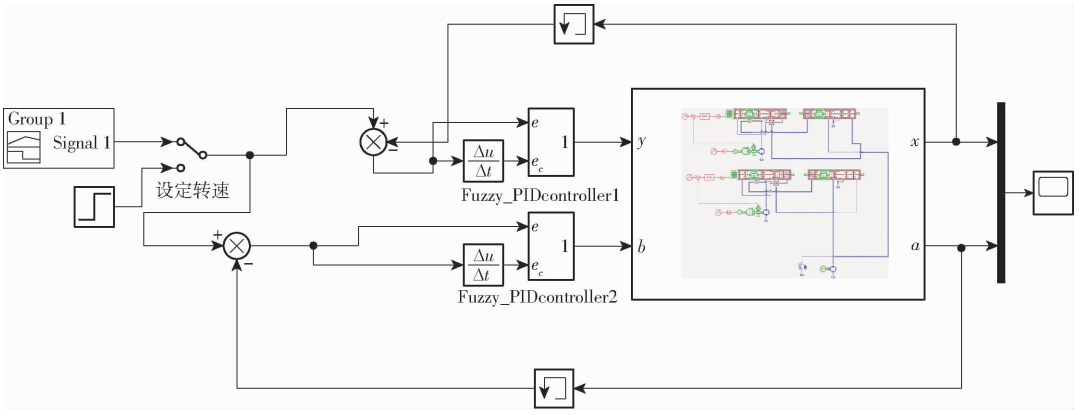

图 11 液压系统与控制器联合仿真模型

Fig. 11 Co-simulation model of electro-hydraulic drive controller

2 种典型激励,评估系统在速度突变与负载扰动工况下的响应特性,仿真结果如图 12 所示。

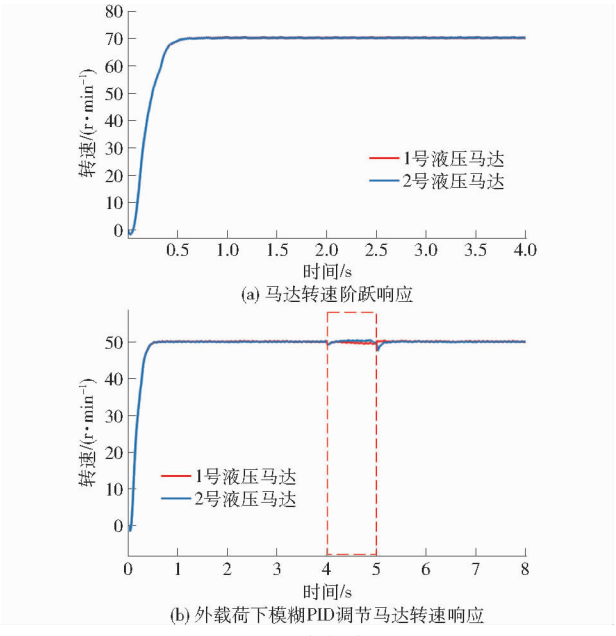

图 12 联合仿真结果

Fig. 12 Co-simulation result curves

由图 12a 可知,系统在阶跃输入 70 r/min 下表现出良好的动态品质:无明显超调,稳态建立时间约 0.6 s,且双液压马达始终保持同步运行。这表明控制系统能够快读反映速度的突变。

由图 12b 可知,系统首先在设定转速 50 r/min 及负载下稳定运行,于第 4 秒突加 100 N·m 的外负载。结果显示:系统响应迅速,0.5 s 内即可跟踪设定转速;突加负载期间,双马达转速仅出现 1.5% 的轻微波动,且保持了良好的同步性;负载撤除后,系统在 0.3 s 内快速恢复至设定转速。表明控制系统在面对突发阻力时,具备良好的鲁棒性与快速恢复能力。

综上,仿真结果表明,本文设计的电液控制系统在多种作业扰动下均表现出稳定的控制性能,能够满足马铃薯精量播种对株距一致性的严格要求。在播种启动、加速、减速及突发负载等典型工况下,系统在控制器作用下超调量小、响应迅速,具有良好的动态性能和稳态精度,证明了其在实际播种作业中的有效性与适应性。

4 电液播种控制系统室内与田间试验

4.1 电液控制系统室内试验

4.1.1 室内试验设计

转速换算为精确带速。针对高速条件下种薯定位与株距测量难题,采用刺针密度为 4 根/cm^2 的刺垫固定下落种薯,并选用 E3F－20C1/L 型高精度激光对射光电开关(感应距离 20 m,响应时间 20 ms)实现种薯间距的非接触检测。该平台可准确模拟实际播种工况,整体结构如图 13 所示。

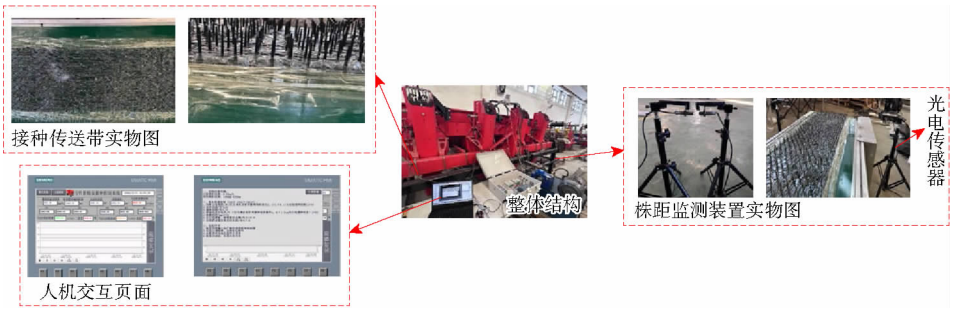

图 13　室内试验平台

Fig. 13　Indoor test platform

4.1.2　室内试验方案

试验开始时，接通电源启动系统，使播种机处于待机状态。接着，通过控制高速传送带的速度模拟不同的播种机前进速度，并利用编码器采集传送带主动轮转速得到前进速度模拟值。计算公式为

$$v_b = \frac{\pi(d_1 + 2c)n_c}{60 \times 1\,000} \tag{8}$$

式中　v_b——马铃薯播种机前进速度，m/s

d_1——传送带主动轮直径，mm

c——传送带皮带厚度，mm

n_c——传送带主动轮转速，r/min

经测量可知，d_1 为 76 mm，c 为 2 mm。

试验时，预处理种薯经播种机精量播种后，种薯置于传送带，由刺垫固定位姿以确保落点精度。当种薯首次遮挡光电传感器光束时，PLC 接收低电平信号启动计时；再次遮挡时终止计时。结合带速计算实际株距，并与理论值比对，控制系统实时采集处理株距数据。采用不同速度和株距组合进行重复试验，综合评估系统稳定性与工况适应性。

4.1.3　室内试验与结果分析

为评估株距控制精度，在室内模拟恒速、加速与减速 3 种工况。通过调节传送带转速实现 2、4、6、8 km/h 的前进速度，并同步控制排种轴匹配 160、185、200、240 mm 的目标株距，多组合试验结果见表 3～5。

表 3　播种速度恒定下实际平均播种株距室内试验结果

Tab. 3　Actual mean planting spacing at constant operational speed　mm

理论播种株距 L_{zl}/mm	前进速度/(km·h^{-1})			
	2	4	6	8
160	160.5	160.5	160.3	161.7
185	183.8	184.7	185.9	186.6
200	201.8	201.4	200.8	200.8
240	242.4	242.2	242.1	242.7

由表 3～5 可知，在不同播种速度下，实际播种株距 L_{zs} 与理论播种株距 L_{zl} 相对偏差均在 8% 以内，优于马铃薯播种机标准要求 10%，由此证明本系统可以在较宽范围内对马铃薯播种株距进行高精度调节控制。

表 4　播种速度加速下实际平均播种株距室内试验结果

Tab. 4　Actual mean planting spacing as a function of increasing operational speed　mm

理论播种株距 L_{zl}/mm	前进速度/(km·h^{-1})			
	2	4	6	8
160	160.8	160.2	160.5	161.2
185	183.2	184.5	185.3	186.8
200	200.2	201.6	200.4	201.1
240	241.3	242.1	240.1	242.3

表 5　播种速度减速下实际平均播种株距室内试验结果

Tab. 5　Actual mean planting spacing as a function of decreasing operational speed　mm

理论播种株距 L_{zl}/mm	前进速度/(km·h^{-1})			
	2	4	6	8
160	160.2	160.4	160.8	160.9
185	184.6	185.3	184.7	185.9
200	200.7	200.9	202.6	201.5
240	238.3	240.6	241.7	241.3

4.2　田间试验与结果分析

在河北省廊坊市固安县中机美诺科技股份有限公司试验田（116°18′43.2″～116°18′46.8″E，39°24′18″～39°24′18″N）开展整机性能试验，该区域土壤平均温度为 14.7℃，土壤含水率为 11.6%，试验选用马铃薯品种为“荷兰 15”与“早大白”，田间试验结果如图 14 所示。

试验设置匀速、加速和减速 3 种工况，每组参数重复 2 次。目标株距设定为 160、185、200、240 mm。加速工况下，速度从 2 km/h 阶梯增至 8 km/h；减速工况则从 8 km/h 阶梯降至 2 km/h；匀速工况分别以恒速 2、4、6、8 km/h 播种。所有工况均采用人工方式测量实际株距（图 15），试验结果见表 6～8。

由表 6～8 可知，马铃薯播种机电液控制系统在田间作业中工作稳定性良好，不同工况下实际播种株距 L_{zs} 与理论播种株距 L_{zl} 的相对偏差均不大于



图 14 田间试验场景

Fig. 14 Field experimental context

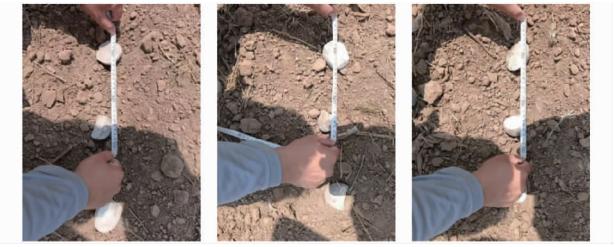

图 15 实际株距测量

Fig. 15 Actual plant spacing measurement

表 6 播种速度恒定下实际平均播种株距田间试验结果

Tab. 6 Actual mean planting spacing at constant operational speed

理论播种株距 L_{zl}/mm	前进速度/(km·h^{-1})			
	2	4	6	8
160	159.2	158.5	160.5	163.5
185	185.5	184.3	186.9	185.3
200	196.7	200.0	197.8	198.2
240	240.2	241.1	240.2	241.5

8%,优于马铃薯播种机标准要求规定的 10% 合格阈值,验证了该系统在实际播种作业中可有效实现株距精准调控,在速度 2 ~ 8 km/h 及株距 160 ~ 240 mm 工况下,控制精度满足马铃薯播种要求。

表 7 播种速度加速下实际平均播种株距田间试验结果

Tab. 7 Actual mean planting spacing as a function of increasing operational speed

理论播种株距 L_{zl}/mm	前进速度/(km·h^{-1})			
	2	4	6	8
160	160.4	161.8	161.5	164.5
185	184.5	183.3	184.9	185.4
200	203.3	206.5	203.5	201.0
240	242.5	244.5	240.5	241.0

表 8 播种速度减速下实际平均播种株距田间试验结果

Tab. 8 Actual mean planting spacing as a function of decreasing operational speed

理论播种株距 L_{zl}/mm	前进速度/(km·h^{-1})			
	2	4	6	8
160	157.1	160.6	163.0	162.0
185	189.2	188.4	188.5	195.0
200	197.3	202.3	200.6	200.3
240	239.6	241.0	244.5	238.5

5 结论

(1)研发一种马铃薯播种机自适应智能播种控制系统,采用液压马达驱动替代传统地轮驱动方式,实现株距无级调节,有效克服滑移导致的株距不均匀问题。

(2)设计双路独立液压调速系统与集成阀块,实现 2 路播种单元同步控制,系统响应时间小于 0.5 s,转速波动小于 1.5%,具备高动态性能。

(3)构建基于模糊 PID 的转速闭环控制系统,在速度 2 ~ 8 km/h 与株距 160 ~ 240 mm 工况下,株距相对偏差不大于 8%,满足田间精量播种要求。

参 考 文 献

[1] 王薇. 坚定信心共同促进马铃薯产业和谐发展[J]. 食品工业科技,2009(8):18 - 20.
WANG Wei. Strengthening confidence and jointly promoting the harmonious development of potato industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2009(8):18 - 20. (in Chinese)

[2] 罗其友,高明杰,张烁,等. 中国马铃薯产业国际比较分析[J]. 中国农业资源与区划,2021,42(7):1 - 8.
LUO Qiyou, GAO Mingjie, ZHANG Shuo, et al. Comparative analysis on potato industry between China and other countries[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(7):1 - 8. (in Chinese)

[3] 黄凤玲,张琳,李先德,等. 中国马铃薯贸易及竞争力分析[J]. 中国马铃薯,2017,31(3):178 - 185.
HUANG Fengling, ZHANG Lin, LI Xiande, et al. Analysis of China's potato trade and competitiveness[J]. Chinese Potato, 2017, 31(3): 178 - 185. (in Chinese)

[4] 杨帆,孙步功,郑小保,等. 马铃薯收获机的研究现状及发展趋势[J]. 林业机械与木工设备,2021,49(10):4 - 10.
YANG Fan, SUN Bugong, ZHENG Xiaobao, et al. Research status and development trend of potato harvesters[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2021, 49(10): 4 - 10. (in Chinese)

[5] 史明明,魏宏安,刘星,等. 国内外马铃薯收获机械发展现状[J]. 农机化研究,2013,35(10):213 - 217.
SHI Mingming, WEI Hongan, LIU Xing, et al. The present situation of potato harvester development at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(10): 213 - 217. (in Chinese)

[6] 李洋,王楠,蒲连影,等. 国内外马铃薯种植机械研究现状[J]. 农业工程,2022,12(1):15 - 20.

LI Yang, WANG Nan, PU Lianying, et al. Research status of potato planting machinery at home and abroad[J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(1): 15 - 20. (in Chinese)

[7] 黄爱珍. 马铃薯产业发展现状及对策[J]. 农业开发与装备,2021(8):42 - 43.
HUANG Aizhen. Development status and countermeasures of potato industry[J]. Agricultural Development & Equipments, 2021(8): 42 - 43. (in Chinese)

[8] 高全德,高爱民,孟养荣. 马铃薯种植机研究现状及发展趋势[J]. 林业机械与木工设备,2023,51(5):11 - 14.
GAO Quande, GAO Aimin, MENG Yangrong. Research status and development trend of potato planters[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2023, 51(5): 11 - 14. (in Chinese)

[9] 杨小平, 石林榕, 柏永祥,等. 包衣党参联合直播机排种装置的设计与试验[J]. 农机化研究,2025,47(5):88 - 93.
YANG Xiaoping, SHI Linrong, BAI Yongxiang, et al. Design and experiment of seed metering device for coated codonopsis pilosula combined direct seeding machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(5): 88 - 93. (in Chinese)

[10] 李学强,孙传祝,卢延芳,等. 参数可调式马铃薯播种机设计[J]. 湖北农业科学,2015,54(20):5140 - 5144.
LI Xueqiang, SUN Chuanzhu, LU Yanfang, et al. Design of a parameter-adjustable potato planter[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(20): 5140 - 5144. (in Chinese)

[11] ASTANAKULOV K D, FOZILOV G G, KURBANOV N M, et al. Grinding of the grains according to parameters of hummers in double-staged grinder-crusher[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 614(1): 012129.

[12] ANON. GL 420 Exacta 型马铃薯播种机产品介绍[EB/OL]. (2025 - 02 - 13) https://products.grimme.com/cn/p/gl - 420 - exacta.

[13] ANON. Double L 9540 系列马铃薯播种机产品介绍[EB/OL]. (2016 - 05 - 15) https://www.doublelglobal.com/potato - planter.php#.

[14] ANON. 中机美诺产品介绍[EB/OL]. (2025 - 03 - 19) http://www.menoble.com/productinfo/862393.html.

[15] 杨然兵,王婕,尚书旗,等. 圆台格盘式马铃薯育种试验播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(1):84 - 93.
YANG Ranbing, WANG Jie, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of potato breeding planter with rotary table grid[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(1):84 - 93. (in Chinese)

[16] FOZILOV G G, ARIFIN A S, KHUDAEV I, et al. Comparing industrial grain and seed for sowing of corn in the conditions of Uzbekistan[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 868(1): 012051.

[17] KIM Y J, KIM H J, RY K H, et al. Fertiliser application performance of a variable-rate pneumatic granular applicator for rice production[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(4): 498 - 510.

[18] BUITENWERF H, HOOGMOED W B, LERINK P, et al. Assessment of the behaviour of potatoes in a cup-belt planter[J]. Biosystems Engneering, 2006, 95(1): 35 - 41.

[19] 周帅. 变量施颗粒肥液压马达驱动控制系统研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2022.
ZHOU Shuai. Research on hydraulic motor drive control system for variable application of granular fertilizer[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[20] 张怀亮,彭玲,周井行. TBM 液压阀块流道压降特性研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2017,45(9):34 - 39, 66.
ZHANG Huailiang, PENG Ling, ZHOU Jingxing. Research on pressure drop characteristics of TBM hydraulic valve block flow channels[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(9): 34 - 39, 66. (in Chinese)

[21] 李伟,张秀梅,邵明玺. 丘陵山地拖拉机悬挂液压集成阀块结构参数设计及优化[J]. 中国农机化学报,2024,45(9):153 - 158.
LI Wei, ZHANG Xiumei, SHAO Mingxi. Structural parameter design and optimization of hydraulic integrated valve block for tractor suspension in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(9): 153 - 158. (in Chinese)

[22] 林泉. AMEsim 软件在千斤顶液压回路动态性能仿真分析中的应用探究[J]. 装备制造技术,2016(1):155 - 157.
LIN Quan. Application of AMEsim software in dynamic performance simulation analysis of jack hydraulic circuit[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(1): 155 - 157. (in Chinese)

[23] 刘春霞. 基于模糊 PID 的电子元器件电机温度自动化控制[J]. 自动化与仪器仪表,2024(12):46 - 51.
LIU Chunxia. Automatic temperature control of electronic component motor based on fuzzy PID[J]. Automation & Instrumentation, 2024(12): 46 - 51. (in Chinese)

[24] 汪昕,杨德秋,李洋,等. 马铃薯捡拾装置作业参数模糊 PID 自调节系统研究[J]. 农业机械学报,2025,56(7):361 - 373.
WANG Xin, YANG Deqiu, LI Yang, et al. Fuzzy PID self adjusting system for operation parameters of potato picking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(7):361 - 373. (in Chinese)

[25] 王毅哲. 基于 MATLAB/Simulink 的制动系统结构及控制问题研究[J]. 自动化与仪器仪表,2024(9):23 - 28.
WANG Yizhe. Research on brake system structure and control based on MATLAB/Simulink[J]. Automation & Instrumentation, 2024(9): 23 - 28. (in Chinese)