doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.033

气力式精量播种机电控系统集成设计与分布式电驱调压控制策略

李宝刚　王　祥　李玉环　杨发展　刘　鹏　刘尊民
（青岛理工大学机械与汽车工程学院，青岛 266520）

摘要：随着高速高密精量播种需求增加，气力式播种机得到广泛应用。目前，气力式播种机多采用集中式风机驱动，但风压调节难以精确差异化，且成本较高。同时，排种控制、风压调节和监测系统通常独立研发，缺乏信息共享，难以实现协调控制，整体成本较高。因此，本文针对气力式精量播种机开发了集成电控系统并开展了电驱精确调压控制研究，该电控系统集成了电驱调压、电驱排种、播种监测、显示系统，可实现系统间信息的互通和各播种单体风压差异化精确调节，满足变工况自适应变压，余行停播、隔行停播功能需求，降低成本和能耗。基于 PID 控制算法制定了各播种单体电驱调压控制策略，并开展了试验测试。针对自研的气吸式玉米排种器进行了电驱调压控制台架试验，通过对 PID 参数的整定确定了 K_p、K_i、K_d 最优值分别为 0.25、4.57、0.03。当作业速度为 6 km/h 时，玉米和大豆最优风压分别为 2.8 kPa 和 5.1 kPa。最后，通过室外排种试验车进行了功能验证，试验结果表明系统实现了控制监测与信息互通功能，具备精确风压调节能力，有效保障了播种合格率和株距一致性。

关键词：气力式播种机；集成电控系统；电驱调压；差异化调节；控制策略
中图分类号：S24　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)09-0417-10　　**OSID**：

Integrated Development of Pneumatic Precision Seeder Drill Electronic Control System and Distributed Electric Drive Pressure Regulation Control Strategy

LI Baogang　WANG Xiang　LI Yuhuan　YANG Fazhan　LIU Peng　LIU Zunmin
(*School of Mechanical and Automotive Engineering*, *Qingdao University of Technology*, *Qingdao* 266520, *China*)

Abstract: With the increasing demand for high-speed, high-density, and precise sowing, pneumatic seeders have been widely used. Currently, pneumatic seeders mostly use centralized fan drives, but it is difficult to adjust the wind pressure accurately and differentially, and the cost is relatively high. At the same time, the seed distribution control, wind pressure adjustment, and monitoring systems are usually developed independently, lacking information sharing, which makes it difficult to achieve coordinated control, resulting in a higher overall cost. Therefore, an integrated electronic control system for pneumatic precision seeders was developed and research on electronically driven precise pressure control was conducted. The electronic control system integrated electronic pressure regulation, electronic seed distribution, seeding monitoring, and display systems, enabling information exchange between systems and precise differential adjustment of wind pressure for each seeding unit. It met the requirements for adaptive pressure adjustment under varying working conditions, as well as features such as row-stop and skip-row seeding. This helped reduce costs and energy consumption. A control strategy for electronically driven pressure regulation of each seeding unit was developed based on the PID control algorithm, and experimental tests were conducted. For the self-developed pneumatic maize seed distributor, a test bench for electronically driven pressure regulation control was carried out. Through tuning the PID parameters, the optimal values for K_p, K_i, and K_d were determined to be 0.25, 4.57, and 0.03, respectively. At operating speed of 6 km/h, the optimal wind pressures for maize and soybean were 2.8 kPa and 5.1 kPa, respectively. Finally, functional verification was conducted by using an outdoor seed distribution test

收稿日期：2025-02-04　修回日期：2025-05-03
基金项目：国家自然科学基金青年基金项目(52202508)、山东省博士后自然科学基金创新项目(SDCX-ZG-202400208)、中央引导地方科技发展资金项目(2024YD012)和山东省自然科学基金青年基金项目(ZR20220E231)
作者简介：李宝刚(1990—)，男，副教授，博士，主要从事智能农机装备研究，E-mail：baog_li@alu.cqu.edu.cn
通信作者：李玉环(1991—)，男，副教授，博士，主要从事精量播种装备研究，E-mail：18612897966@163.com

vehicle. The test results showed that the system successfully achieved control monitoring and information exchange functions, with precise wind pressure regulation capabilities. This effectively ensured the sowing qualification rate and plant spacing consistency.

Key words: pneumatic seeder; integrated electronic control system; electronically driven pressure regulation; differential adjustment; control strategy

0 引言

随着农业机械化技术的快速发展,气力式播种机因其高效性与良好的适应性,逐渐成为现代精准农业的核心装备[1-3]。然而,传统的气力播种机通常使用拖拉机的 PTO 直接连接或液压泵-液压马达系统来驱动风机。这些方式在性能上存在一些缺陷:当采用 PTO 直连方式时,风机的压力受到拖拉机转速的限制,在低油门开度情况下,可能导致风压不足,从而影响种子的播种质量;当采用液压驱动的风机系统,包含变量泵、液压马达等多个组件,结构相对复杂、成本较高并且控制较为困难。

因此,国内外相关学者对此进行了详细的分析和研究,如王丰等[4]通过 CFD 仿真对气吸式播种机风机的内部结构进行了优化改进,显著地提高了工作效率。但其研究未能突破集中式风机的固有局限,因难以实现风压精确调控,从而导致播种作业中出现能耗过高等问题,最终影响作业经济性。黄智钢等[5]设计了一种可调节施肥量的施肥机及具有其的插秧机,其每路施肥盒采用单独的风机,不仅保证了各路风压一致性,而且实现了施肥的精确控制。但在加速、转弯、掉头等变工况下,各播种单体所处位置及作业状态存在较大的差异性,上述技术无法根据各单体实际工况进行动态风压补偿调节,严重制约了复杂工况下的播种均匀性和作业质量。随着电驱排种、监测系统等智能控制技术的成熟,如姚颖飞等[6]基于模糊 PID 为控制策略算法开发了适合高速作业的玉米精量电驱排种单体控制系统,经过模拟仿真和试验验证,该控制系统功能完善,运行稳定。车宇等[7]基于红外检测技术,研制了播种质量监测系统,经过台架和田间试验验证播种质量监测准确率可达 95% 以上。然而,当前播种机的排种控制系统、风压调节系统、监测系统大多为独立设计研发,无法进行数据信息共享,难以实现各系统之间的协调控制。

针对上述存在的问题,前期开展了风压控制策略研究,并发表了相关专利[8-9]。本文针对气力式精量播种机开发一款集成电控系统。系统将电驱调压、电驱排种、智能监测集成设计,实现各模块间信息互通,而且基于 PID 控制算法制定各播种单体电驱调压控制策略,以实现在复合播种、隔行停播、余行停播、转弯补偿等具体的工况下对风压进行具体的量化补偿和调压。

1 总体结构和工作原理

气力式精量播种机电控集成系统主要有电源模块、测速模块、控制模块、显示模块、监测模块以及分式单体模块(图 1)。通过综合分析国内外研究成果[10-11],与传统 PTO 直驱式风机和 PTO + 液压驱动式风机(图 2)相比,分布式电机直驱式风机与排种器直连,压降小,可实现分布分控差异化精准调节,响应速度快,同时在传动效率、设备成本和稳定性等关键性能指标上具有明显优势。

在播种作业中,主控制器 STM32 根据设定的目标风压,通过风压自适应闭环系统调节风压至目标值。然后,主控器通过测速模块获取车速,计算伺服电机转速并通过 CAN 通讯控制伺服电机,驱动排种盘旋转以传递种子。同时,红外传感器监测播种质量,将数据上传至显示模块,实时监控并为调整提供依据。

2 系统硬件和软件设计

2.1 系统硬件设计

气力式精量播种机电驱集成系统硬件设计主要涵盖信号处理、显示控制、播种单体、速度采集和数据监测等模块设计。该设计包括各模块与主控芯片的通信电路设计、主控芯片核心电路设计,以及原理图和 PCB 板的绘制。此外,还包括电路板打样和焊接工作。

2.1.1 信号处理模块设计

主控芯片作为整个系统的“大脑”,主要采用由意法半导体公司生产的基于 ARM Cortex - M3 内核的 STM32F103C8T6 主控芯片。该主控芯片采用 72 MHz 运行频率内核,集成 USART、SPI、CAN 等丰富通信接口,在保持低功耗特性的同时提供高效运算性能,并具备灵活可扩展的系统架构设计。

2.1.2 显示模块

显示模块由人机互动显示屏组成,用于设置作业参数、控制指令和监测参数显示(图 3)。采用型

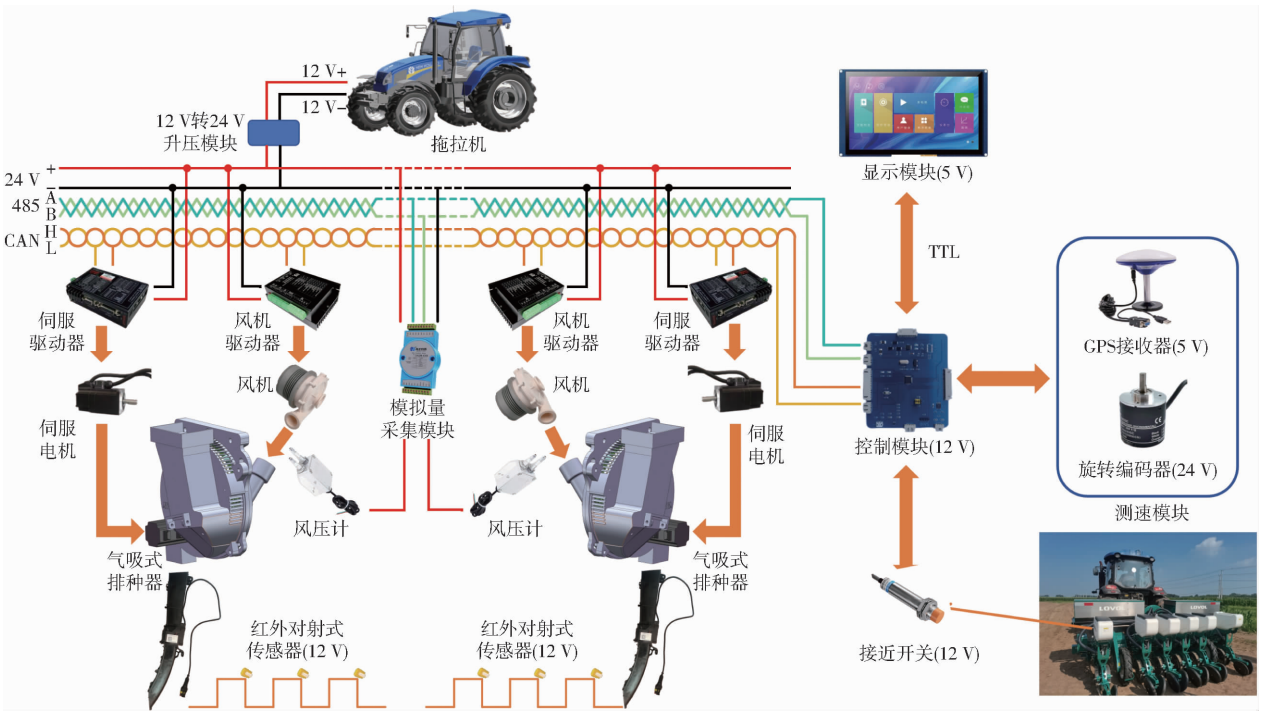
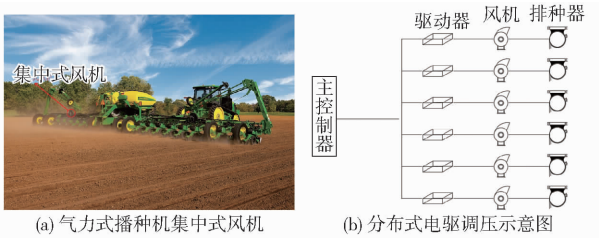


图 1　气力式精量播种机电驱集成系统原理图

Fig. 1　Schematic diagram of the pneumatic precision seeder electo-drive integrated system



(a) 气力式播种机集中式风机　(b) 分布式电驱调压示意图

图 2　风机布置方式

Fig. 2　Layout mode of fan

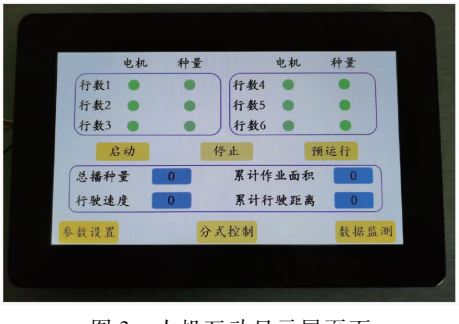


图 3　人机互动显示屏页面

Fig. 3　Human-machine interactive display screen page

号为 TIJ060XA1_011R_1 的串口电阻触摸屏，具备丰富的页面和控件特效、大容量存储、易用的界面编辑功能。同时，该显示屏支持简单的串口通讯，进而实现与主控制器通讯。

2.1.3　速度采集模块设计

速度采集主要通过测速模块实现，进行播种作业时，以 GPS 接收器采集的拖拉机速度为主。当车速较低、信号差以及不稳定的情况时，采集速度的误差较大，无法作为精量播种依据。此时，需要在地轮轴上安装旋转编码器，通过测量地轮转速作为精量播种依据。

GPS 接收器选用的型号为 BD－8953N。该接收器测量精度为 0.1 m/s，工作环境为 －40 ~ 85℃，热启动只需 1 s，冷启动为 26 s，电平类型为 TTL 电平。主控制器通过标准的 NMEA－0183 协议来实现与 GPS 接收器通讯。

旋转编码器选用的型号为 E6B2－CWZ6C。该旋转编码器响应频率为 100 kHz，输出开始、结束时间为 1 μs，工作环境为 －10 ~ 70℃、输出形式为 NPN 集电极开路输出。主控制器通过测量单位时间内的脉冲数来实现速度的采集。

2.1.4　监测模块设计

监测模块主要分为两部分，一个是有关播种质量的监测，主要由多个红外对射式传感器和导种管组成。另一个是有关风压的监测，主要由多个 HALO－FY－WG 型微差压/风压变送器及 DAQM－4206 采集模块构成。风压计量程为 －20 ~ 20 kPa，输出 0 ~ 3.3 V 模拟信号，通过采集模块将电压信号转换为 RS485 数字信号，最终经 485 通讯模块（图 4）与 STM32 主控器实现数据交互。

2.1.5　播种单体模块设计

播种单体模块主要由电驱排种、电驱调压和气力式排种器 3 部分构成。电驱排种通过伺服驱动器驱动电机及减速器，带动排种盘旋转；电驱调压采用风机系统为排种提供负压吸附功能；气力式排种器采用青岛理工大学研制的气吸式精量排种器。其中

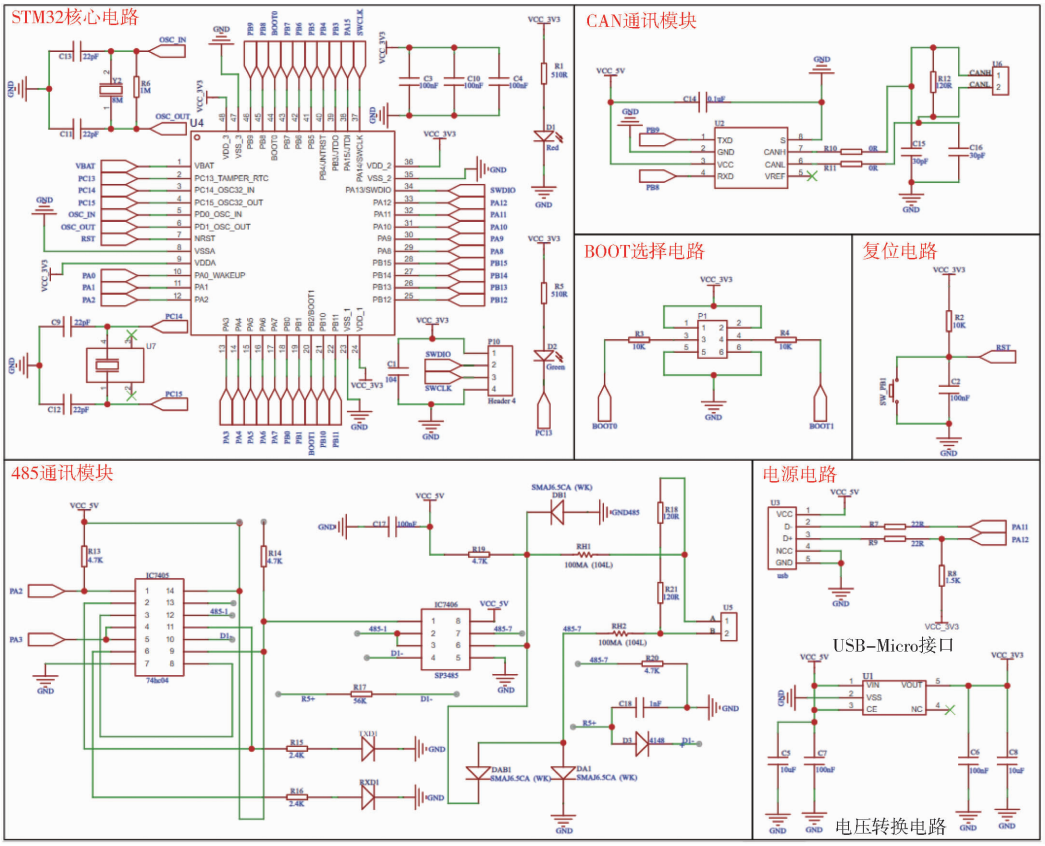


图 4 气力式精量播种机电驱集成系统电路原理图

Fig. 4 Circuit diagram of electric drive integrated system for pneumatic precision seeder

电驱排种与调压系统均通过 CAN 总线(图 4)与 STM32 主控模块实现通信。

(1)风机选型

参考气吸式玉米高速精量排种器投种性能[12],播种物为玉米,目标株距为 25 cm,作业速度为 14 km/h 时,工作负压为 4.5 kPa。根据风管直径、长度可得风机风量需求为

$$Q = 60\,000AV \tag{1}$$

式中 Q——风量,L/min

A——风管横截面积,m^2

V——风速,取 8 m/s

通过达西-韦斯巴赫方程来估算压力损失为

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \tag{2}$$

式中 ΔP——压力损失,Pa

λ——摩擦因子,取 0.02

L——风管长度,m

D——风管直径,m

ρ——空气密度,取 1.2 kg/m^3

其中,风管横截面积为 0.001 256 m^2,风管长度为 1.5 m,风管直径为 0.04 m,由式(1)、(2)得风量为 602.88 L/min,压力损失为 28.8 Pa,所以需要一个能够提供风量约 602.88 L/min 和压力至少 4 528.8 Pa 的风机。

为补充理论推导中未考虑的排种器气道密封性、风管压降及其他压力损失因素,本文搭建了风管压降试验装置(图 5),测试不同风管长度下的最大风压,分析风管长度对风压的影响。

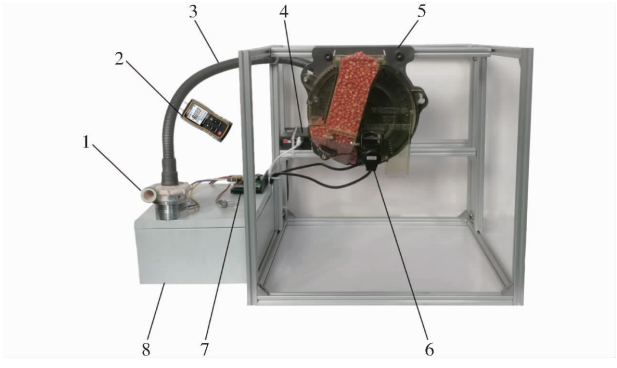


图 5 风管压降试验装置

Fig. 5 Duct pressure drop test device

1. 风机 2. 风压计 3. 风管 4. 伺服驱动器 5. 气吸式排种器 6. 伺服电机 7. 风机驱动器 8. 控制箱

根据图 6 可知,风管压降随长度增加而增大,最大压降为 -13.6 kPa。考虑到压降和预留余量,选择至少能提供风量 602.88 L/min 和风压 18.1 kPa 的风机。因此,选用 P560-24 型直流无刷风机,最大风压 23 kPa,最大风量 1 550 L/min,并搭配内置 PID 控制算法的驱动器,支持 485 和 CAN 通讯接口,确保系统高效稳定运行。

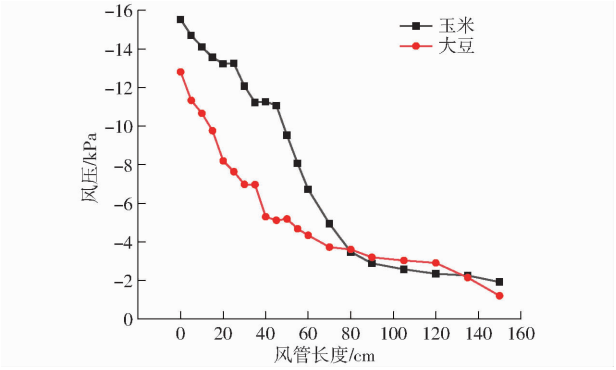


图 6　风管压降试验结果

Fig. 6　Duct pressure drop test results

(2)电机选型

参考多目标电驱智能变量精密排种系统[13]，进行了排种电机驱动扭矩试验。试验装置(图 7)在气吸式排种器和电机之间安装扭矩传感器，利用 RS485 通讯模块实时传输扭矩、转速等信息至计算机。

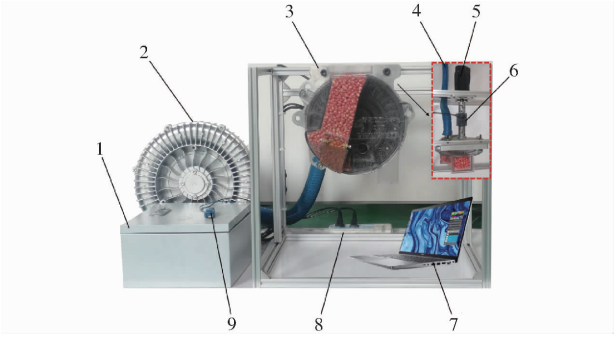


图 7　排种电机扭矩试验装置

Fig. 7　Seed motor torque test device

1. 控制箱　2. 风机　3. 气吸式排种器　4. 风管　5. 电机　6. 动态扭矩传感器　7. 计算机　8. 电源　9. RS485 通讯模块

上述试验测试结果如图 8 所示。

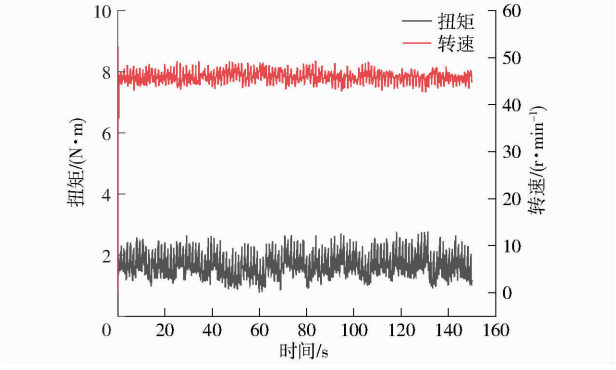


图 8　排种电机扭矩试验结果

Fig. 8　Seed motor torque test results

由图 8 可知排种器在电机最大转速、最大风压下的扭矩为 3.01 N·m，伺服电机驱动扭矩为

$$M_1 = K\frac{M_2}{i_1 i_2} \tag{3}$$

式中　M_1——排种电机驱动扭矩，N·m

K——安全系数，取 3

M_2——作业时排种器最大负荷，N·m

i_1——周向传动传动比，取 7

i_2——减速器传动比，取 10

采用的气吸式玉米精量排种器作业时最大排种负荷为 3.01 N·m，由式(3)得排种电机扭矩为 0.13 N·m。因此，选用 ACL40100 - S52600M - 24 - 8 型伺服电机，额定扭矩为 0.32 N·m，并配备 IDS830 低压直流伺服驱动器。

2.2　系统软件设计

气力式精量播种机电驱集成系统的驱动程序采用 C 语言编写，并在 Keil Vision 5 平台上进行开发。程序主要功能是分析和处理来自各模块的信息，依据工况需求实现模块协调控制。具体流程如图 9 所示，控制系统在循环中不断检查屏幕控制指令及播种作业参数是否更新，并根据当前控制指令和参数调整风机及电机转速，实现不同工况下的实时调整。

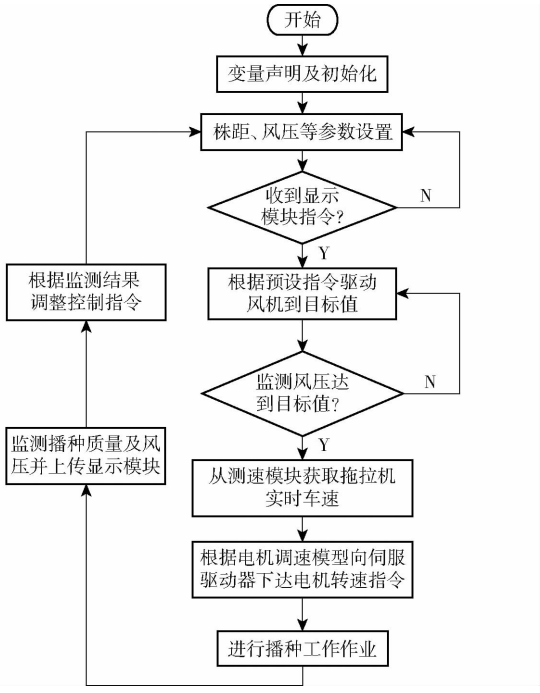


图 9　整体流程图

Fig. 9　Overall flow framework diagram

2.2.1　风压自适应闭环系统

风压自适应闭环系统旨在变化的工况下始终保持风压稳定，实现整个系统闭环控制。其工作流程如图 10 所示。首先，设定目标风压 p_{target}，同时主控器 STM32 通过 MODBUS 协议采集模块寄存器中的实际风压 p_{real}。然后，将目标值与实际值输入到增量式 PID 控制函数中。最后，通过调节比例常数 K_p、积分常数 K_i 和微分常数 K_d，实时调整风机驱动器转速，直到实际风压稳定并接近目标风压。

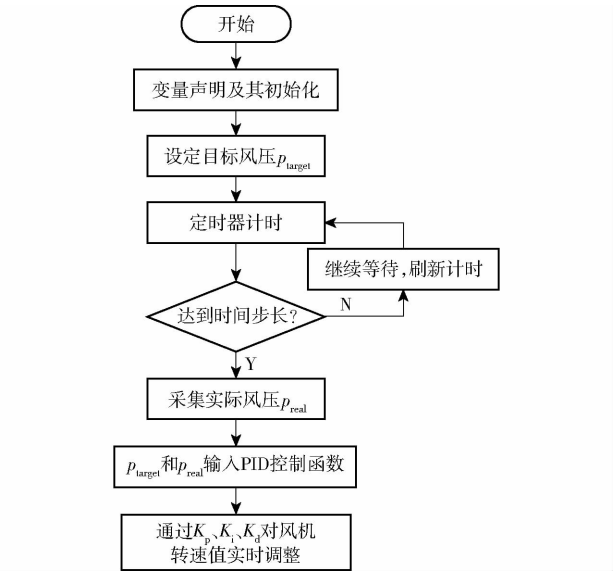


图 10 风压自适应反馈系统工作流程图

Fig. 10 Schematic diagram of the wind pressure adaptive feedback system

2.2.2 电机调速模型

在播种作业过程中,为确保播种间距均匀,需要使车速与播种参数及伺服电机的转速相匹配。参考基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统[14],电机转速与前进速度关系为

$$n_{rel}=\frac{6\,000vi_1i_2}{3.6sx_{aim}} \tag{4}$$

式中 s——排种盘型孔数

x_{aim}——目标株距,cm

v——拖拉机前进速度,km/h

n_{rel}——电机实际转速,r/min

由于伺服驱动器内置电机转速转换,公式为

$$n_{rel}=\frac{3\,000n_{xie}}{8\,192} \tag{5}$$

式中 n_{xie}——电机写入转速,r/min

由式(4)和式(5)可得,主控制器 STM32 写入伺服驱动器的伺服电机转速为

$$n_{xie}=\frac{16\,384vi_1i_2}{3.6sx_{aim}} \tag{6}$$

2.2.3 监测模块

监测模块采用红外对射式传感技术实现播种质量在线检测[15-19],工作原理如图 11 所示,图中,C 为漏播量;E 为重播量;M 为合格量;Z 为播种总量;c 为漏播率;e 为重播率;m 为合格率;n 为溢出次数;N_i为第 1 次捕获种子信号的时间,s;N_{i+1}为第 2 次捕获种子信号的时间,s。主要通过检测种子遮挡触发的脉冲信号,利用定时器的输入捕获功能记录 2 次中断时的计数值。同时,结合溢出中断的溢出次数 n,得 2 粒种子间隔时间 Δt 为

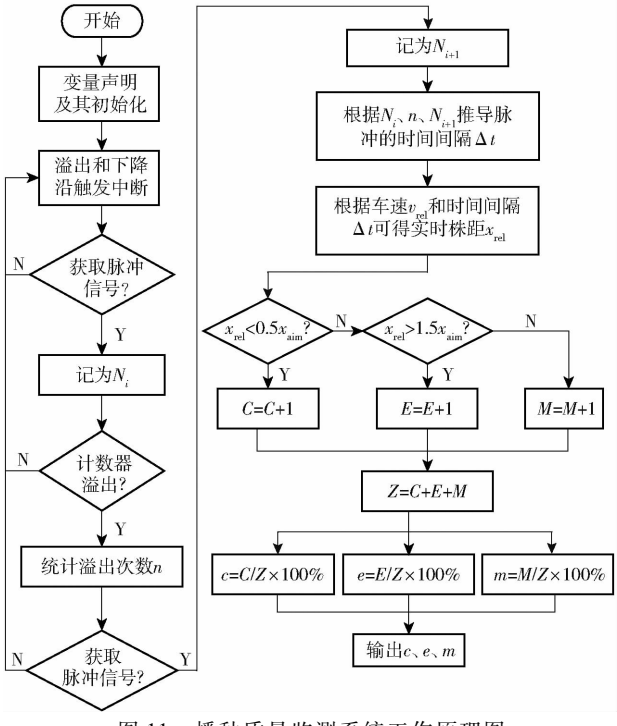


图 11 播种质量监测系统工作原理图

Fig. 11 Schematic diagram of the seed quality monitoring system

$$\Delta t=\frac{nT-N_i+N_{i+1}}{f} \tag{7}$$

式中 T——定时器自动重装载值

f——定时器计数频率

实时播种株距 x_{rel} 等于拖拉机前进速度 v 和 2 粒种子间隔时间 Δt 乘积[20],即

$$x_{rel}=v\Delta t \tag{8}$$

同时,参照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》对播种量合格率、漏播率和重播率等播种参数进行详细计算,并根据株距判断合格率、漏播率和重播率等播种参数进行统计。具体为:如果

$$x_{rel}<0.5x_{aim} \tag{9}$$

计为重播;如果

$$x_{rel}>1.5x_{aim} \tag{10}$$

计为漏播;如果

$$0.5x_{aim}\leqslant x_{rel}\leqslant 1.5x_{aim} \tag{11}$$

计为合格。

3 风压自适应闭环控制系统

3.1 PID 闭环系统控制

风压自适应反馈系统采用 PID 控制算法,由于 PID 控制算法的使用十分广泛、控制精确,常用于温度、压力等各种控制系统[21-24]。因此,通过采用 PID 控制算法可实现风压闭环控制,图 12 为 PID 闭环控制基本原理图。

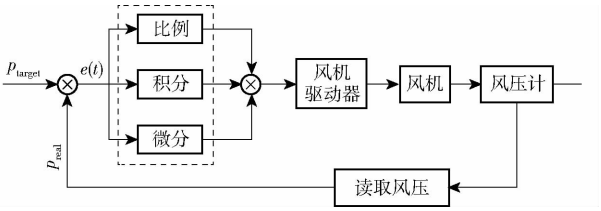


图 12　PID 闭环控制基本原理图

Fig. 12　Sowing quality monitoring system

其中 $e(t)$ 是输入偏差，为目标风压 p_{target} 与实际风压 p_{real} 的差值，即

$$e(t) = p_{target} - p_{real} \tag{12}$$

PID 控制器通过持续地计算 t 时刻目标风压与实际风压的差值，并通过比例控制、积分控制、微分控制参数的调整对差值线性组合后输出值，主控器通过 CAN 通讯将输出值传递到驱动器，使实际风压迅速达到目标风压。

$$P_w(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)\,dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{13}$$

式中　$P_w(t)$——计算偏差

由于微控制器采用软件控制，为了实现 PID 编程化，所以将式(13)进行离散化处理，可得

$$P_w(t) = K_p e(k) + K_i \sum e(j) + K_d(e(k) - e(k-1)) \tag{14}$$

由式(14)可知，位置式 PID 的积分项需要长时间累加误差，容易产生累计误差，为了消除累计误差的影响，同时减少软件计算量，所以将相邻 2 次的修正值作差，可得增量式 PID 控制模型

$$\begin{aligned}\Delta P_w(k) &= P_w(k) - P_w(k-1) = \\ &K_p(e(k) - e(k-1)) + K_i e(k) + \\ &K_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))\end{aligned} \tag{15}$$

式中　$e(k)$——离散误差　　$P_w(k)$——计算偏差

3.2　PID 控制参数整定

通过试凑法，采用“先比例、后积分、最后微分”的整定思想，在实验室针对自研气吸式玉米排种器进行了 PID 参数的整定。其基本原理是，在主控制器中，不断改变 K_p、K_i、K_d，并通过风压自适应闭环系统实现风压的跟随，同时将目标风压、实际风压、风机转速实时传输到计算机，从而确定 K_p、K_i、K_d 最优值，试验装置如图 13 所示。

经过多次试验，在株距为 25 cm，车速为 3 km/h 的工况下确定目标风压为 2.6 kPa，K_p、K_i、K_d 优佳值分别为 0.25、4.57、0.03，试验结果如图 14 所示。

上述结果表明，当不吸附种子时，如图 14a 所示，风压能够迅速提升至目标值(－2.6 kPa)，无超调，整体效果比较良好。当吸附种子时，如图 14b 所示，风压也能够迅速达到目标风压，但风压会因风压计的安装位置、排种盘上种子吸附量的变化等因素

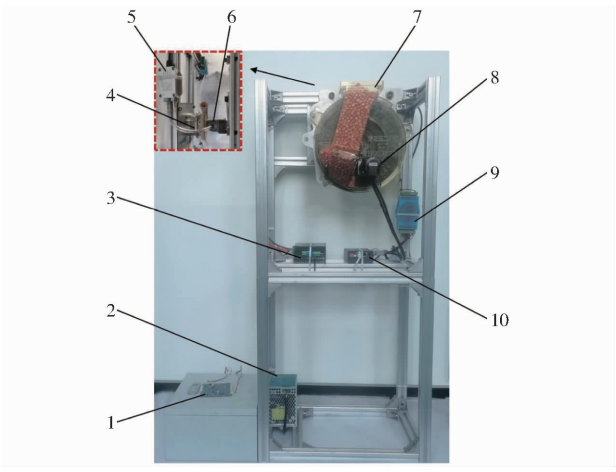


图 13　电驱调压试验装置

Fig. 13　Electric drive pressure regulation test device

1. 主控制器 STM32　2. 电源　3. 风机驱动器　4. 风机　5. 风压计　6. 风管　7. 气吸式排种器　8. 伺服电机　9. 采集模块　10. 伺服驱动器

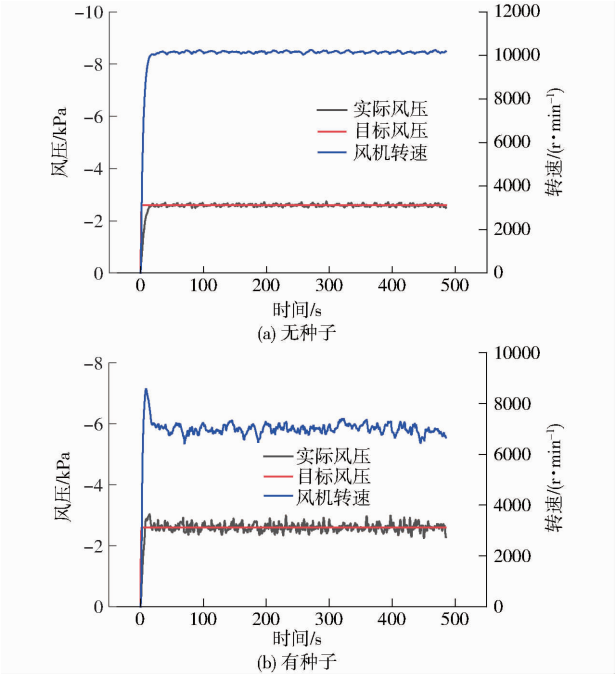


图 14　PID 调试结果

Fig. 14　PID debugging results chart

产生风压波动，但是总体表现良好。

4　试验

4.1　玉米最优风压试验

4.1.1　试验设备

选取郑单 958 玉米和中黄 13 大豆种子，在自制试验台架上进行试验，如图 15 所示，通过排种器下方的红外传感器实时监测播种质量上传到计算机。

4.1.2　试验方法

利用上述搭建的电控系统，为探究玉米播种作

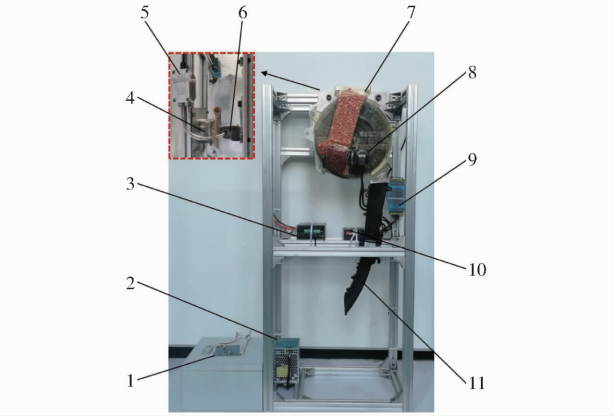


图 15 最优风压试验装置

Fig. 15 Optimal wind pressure test device

1. 主控制器 STM32 2. 电源 3. 风机驱动器 4. 风机 5. 风压计 6. 风管 7. 气吸式排种器 8. 伺服电机 9. 采集模块 10. 伺服驱动器 11. 导种管+红外对射传感器

业中风压的最优区间,选取风压为试验因素,以重播率、漏播率和合格率为性能评价指标。试验参照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》实施,设定播种株距 25 cm、型孔数 35 个,分别在 1.5、6 km/h 2 种作业速度下,测试 2.1 ~ 2.9 kPa 风压区间内的播种性能指标,通过连续统计 300 粒玉米种子,每组试验重复 4 次,取平均值作为试验结果。

4.1.3 试验结果与分析

基于图 16 试验结果加以分析,风压与播种性能呈现显著正相关:随着风压增大,合格率提升、漏播率降低,重播率因清种轮作用保持稳定,以播种合格率 98% 为基准,通过试验发现,当作业速度提升至 6 km/h 时,系统所需最优风压为 2.8 kPa;而低速 1.5 km/h 工况下,风压 2.5 kPa 即可获得更优的株距一致性,据此构建风压-作业速度动态匹配模型,实现精准供种,播种质量与能耗优化。

值得注意的是,在无清种轮情况下,由图 17 可得:随着风压增大,重播率呈增加趋势,而漏播率则持续下降。试验数据显示,当风压处于 2.3 ~ 2.4 kPa 临界区间时,漏播率与重播率达到动态平衡状态。若突破 2.4 kPa 上限,重播现象将加剧导致种子浪费率上升;反之,当风压低于 2.3 kPa 时,漏播缺陷显著增加,可能造成田间缺苗减产。

4.2 大豆最优风压试验

4.2.1 试验方法

试验参照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》实施,选取风压为试验因素,设定播种株距 14 cm、型孔数 45 个,作业速度为 6 km/h。分析在风压 4.5 ~ 5.3 kPa 播种质量状况,通过连续统计 300 粒大豆种子,每组试验重复 4 次,取平均值作为试验结果。

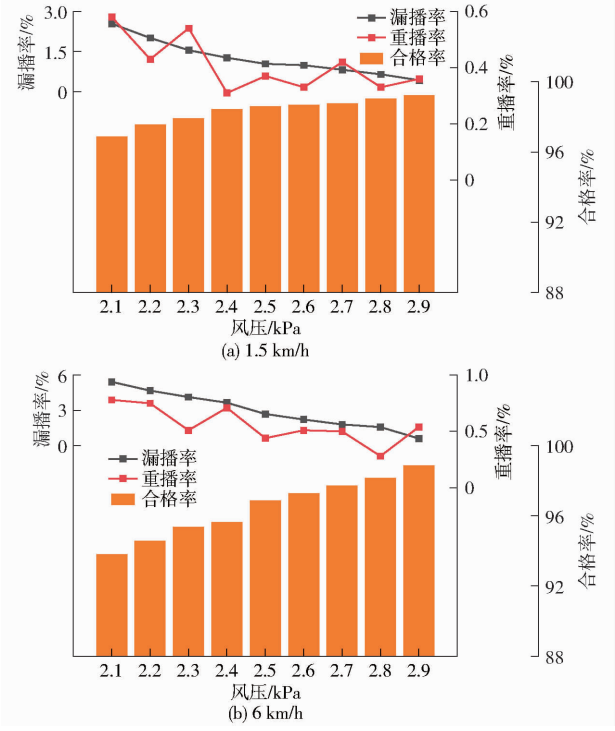


图 16 玉米最优风压试验结果

Fig. 16 Results of optimal wind pressure test in maize

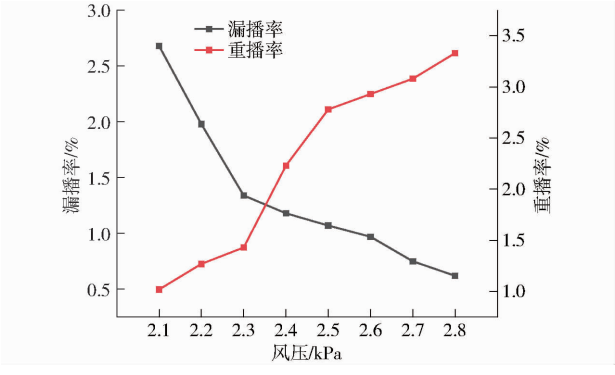


图 17 无清种轮最优风压试验结果(1.5 km/h)

Fig. 17 Optimal wind pressure test results for the seed wheel without seed clearing (1.5 km/h)

4.2.2 试验结果与分析

基于图 18 的试验数据分析表明,当作业速度为 6 km/h 时,风压升高可显著提高大豆播种合格率,并有效降低漏播率;重播率则因清种轮调控效果稳定而基本保持不变。以播种合格率 98% 为基准,大豆最优风压为 5.1 kPa。与玉米试验结果(图 16b)对比可知,由于 2 种作物在籽粒形态和物理特性上的差异,其最优风压存在显著差异。该发现为实现差异化风压调节、优化多种作物播种性能提供了数据支撑。

4.3 功能验证试验

4.3.1 试验设备

经过上述电驱调压试验,验证了电驱调压系统可靠性和效用。由于上述台架试验无法进行室外试

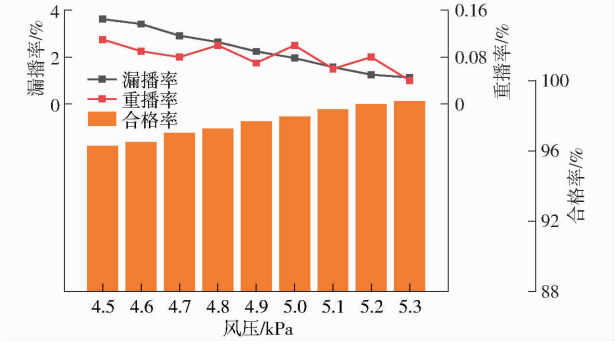


图 18　大豆最优风压试验结果

Fig. 18　Results of optimal wind pressure test for soybean

验，为了验证本文所设计集成化系统的性能，采用课题组所开发的排种性能移动测试平台（图 19）来代替拖拉机进行集成电控系统的试验测试。



图 19　移动测试平台

Fig. 19　Mobile test platform

4.3.2　试验方法

为了验证气力式精量播种机电控集成系统的电驱排种、电驱调压、智能监测等模块是否能够实现信息融合、信息反馈、协调控制等功能，以及电驱调压的可靠性，本文通过移动测试平台，分析试验风压为 2.2、2.5、2.8 kPa 下的播种情况，同时采用人工测量方式，通过连续统计 200 粒玉米种子，重复试验 3 次，取平均值作为试验结果。

4.3.3　试验结果与分析

经过上述的功能验证试验，如图 20 所示，合格率随着风压增大而出现增长趋势，漏播率随着风压的增大而减少。当株距为 25 cm、风压为 2.5 kPa 时，播种合格率为 92% 以上。

同时，如图 21 所示，电控集成系统整体平稳运转，能够实现有效的实时反馈，可以很好地保证播种的均匀性和株距的一致性。

5　结论

（1）进行了气力式播种机电控系统综合集成化设计，增设了电驱调压系统，并与电驱排种、智能监测等功能模块进行集成，实现了各模块间信息共享，播种单体风压差异化调节、精确调节、协同控制、反馈控制，且相对集成式风机减少了成本。为将来智能作业控制提供了技术参考。

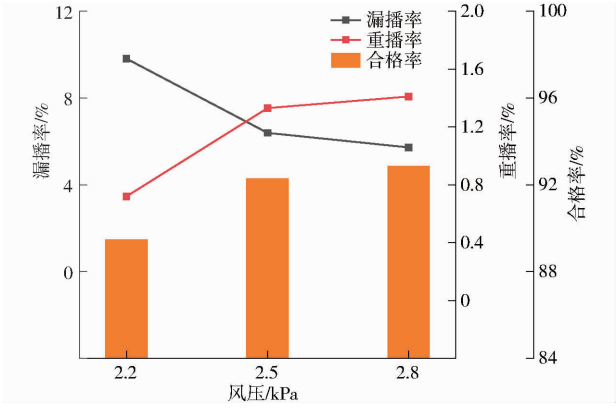


图 20　室外试验结果

Fig. 20　Outdoors experimental results

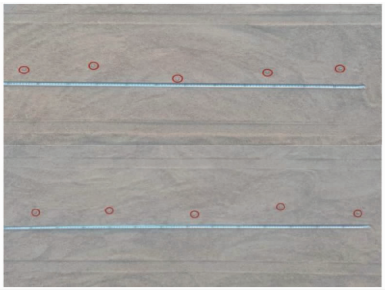


图 21　室外试验效果

Fig. 21　Effect of outdoor experiment

（2）针对自研气吸式玉米排种器，进行了电驱调压 PID 控制研究，设计了风压自适应闭环控制系统。通过试验，确定了 PID 控制器整定参数 K_p 为 0.25、K_i 为 4.57、K_d 为 0.03。在不吸种子试验中，风压能够迅速稳定地达到目标值；而在吸附种子试验中，尽管风压迅速达到目标值，但由于排种盘上种子吸附量的变化等因素，风压出现了波动，整体表现仍然良好。

（3）气力式精量播种机集成电控系统的台架试验和室外移动平台测试结果表明，当株距 25 cm、作业速度 1.5 km/h 时，最优风压为 2.5 kPa，而作业速度提升至 6 km/h 时，最优风压需调整为 2.8 kPa，2 种工况下播种合格率均超过 98%。在大豆播种试验中，当株距 14 cm、作业速度 6 km/h 时，合格率超过 98%。室外平台测试进一步验证了系统的稳定性和可靠性，播种合格率保持在 92% 以上，证明了电控系统的可靠性。

（4）设计的气力式精量播种机电驱调压及集成电控系统，成功实现了电驱调压、电驱排种、排种监测和信息共享等关键功能，并通过精确调控各播种单体间的差异，达到了预期的精准作业目标。

参 考 文 献

[1] 张振国,郭全峰,何进,等. 小麦免耕播种机双导轨滑移式调偏系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(12):59 - 69.
ZHANG Zhenguo, GUO Quanfeng, HE Jin, et al. Design and experiment of double-guide sliding deflection system for no-till wheat seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(12):59 - 69. (in Chinese)

[2] 黄玉祥,高鹏洋,张庆凯,等. 免耕播种机切茬导草组合式草土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(5):67 - 78.
HUANG Yuxiang, GAO Pengyang, ZHANG Qingkai, et al. Design and experiment of grass soil separation device with combination of stubble cutting and grass guiding used for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 67 - 78. (in Chinese)

[3] 李玉环,杨丽,张东兴,等. 豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(7):61 - 73.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 61 - 73. (in Chinese)

[4] 王丰,陶桂香,衣淑娟,等. 气吸式精量播种机风机气流场仿真试验研究[J]. 农机化研究,2020,42(3):182 - 187.
WANG Feng, TAO Guixiang, YI Shujuan, et al. Experimental research on simulation of internal flow field of air suction seeding fan based on CFD[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(3): 182 - 187. (in Chinese)

[5] 黄智钢,黄智红,许成才,张平. 一种可调节施肥量的施肥机及具有其的插秧机:CN113767739A[P]. 2021 - 12 - 10.

[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] 车宇,伟利国,刘婷韬,等. 免耕播种机播种质量红外监测系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(增刊 1):11 - 16.
CHE Yu, WEI Liguo, LIU Xingtao, et al. Design and experiment of seeding quality infrared monitoring system for no-tillage seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 11 - 16. (in Chinese)

[8] 李宝刚,王祥,李玉环,等. 气力式播种机分布分控式电驱调压控制方法及系统:CN118120396A[P]. 2024 - 06 - 04.

[9] 李宝刚,叶桂友,李高伟,等. 气力式播种作业最优风压决策方法、系统及存储介质:CN202410561032.2[P]. 2025 - 01 - 03.

[10] 曹现超,于春伟,张江涛,等. 播种机风机液压驱动设计与试验分析[J]. 拖拉机与农用运输车,2022,49(5):64 - 67.
CAO Xianchao, YU Chunwei, ZHANG Jiangtao, et al. Design and experimental analysis of hydraulic drive for planter fan[J]. Tractor and Agricultural Transport Vehicle, 2022, 49(5): 64 - 67. (in Chinese)

[11] 张铁刚, 杨晓彬. 一种气吸排种器可调速调压电风机:CN119934043A[P]. 2025 - 05 - 06.

[12] 孙文胜,衣淑娟,齐海龙,等. 双盘交错气压式玉米品字形密植高速精量排种器研究[J]. 农业机械学报,2024,55(10):168 - 179.
SUN Wensheng, YI Shujuan, QI Hailong, et al. Design and experiment of twin discs intertwined air-pressure high-speed precision seed-metering device for maize delta-row dense plantings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 168 - 179. (in Chinese)

[13] 张猛. 多目标电驱智能变量精密排种系统研究[D]. 淄博:山东理工大学,2023.
ZHANG Meng. Research on multi-objective electric drive intelligent variable precision seeding system[D]. Zibo: Shandong University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)

[14] 丁友强,杨丽,张东兴,等. 基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统[J]. 农业机械学报,2018,49(8):42 - 49.
DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Control system of motor-driving maize precision planter based on GPS speed measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 42 - 49. (in Chinese)

[15] 丁友强,杨丽,张东兴,等. 玉米变量播种机单体驱动器的设计[J]. 农业工程学报,2019,35(11):1 - 9.
DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design of row-unit driver for maize variable rate planter[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 1 - 9. (in Chinese)

[16] 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)

[17] 解春季,杨丽,张东兴,等. 基于激光传感器的播种参数监测方法[J]. 农业工程学报,2021,37(3):140 - 146.
XIE Chunji, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Seeding parameter monitoring method based on laser sensors[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(3): 140 - 146. (in Chinese)

[18] XIE C, ZHANG D, YANG L, et al. Precision seeding parameter monitoring system based on laser sensor and wireless serial port communication[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 190: 106429.

(下转第 472 页)

rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(3): 37 - 49. (in Chinese)
[22] 张青松,蔡家顺,于良航,等. 冷浸田起垄平整装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 50 - 59.
ZHANG Qingsong, CAI Jiashun, YU Lianghang, et al. Design and experiment of ridging leveling device for cold waterlogged paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024, 55(2): 50 - 59. (in Chinese)
[23] 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)
[24] 林静,李博,李宝筏,等. 阿基米德螺线型缺口圆盘破茬刀参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 118 - 124.
LIN Jing, LI Bo, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment on Archimedes spiral type of gap cutting disc[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014, 45(6): 118 - 124. (in Chinese)
[25] 康建明,解臣硕,王小瑜,等. 滚筒筛式膜杂风选机筛孔清堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 91 - 98.
KANG Jianming, XIE Chenshuo, WANG Xiaoyu, et al. Design and test of screen hole clearing device for trommel sieve type membrane miscellaneous wind separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022, 53(9): 91 - 98. (in Chinese)
[26] 侯守印,陈海涛,史乃煜,等. 双自由度多铰接仿形免耕精量播种单体设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 92 - 101.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, SHI Naiyu, et al. Design and experiment of two-degree-of-freedom multi-articulated profiling no-tillage precision drill unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019, 50(4): 92 - 101. (in Chinese)
[27] 史宇亮,陈新予,陈明东,等. 甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 16 - 25.
SHI Yuliang, CHEN Xinyu, CHEN Mingdong, et al. Design and experiment on ploughshare furrowing ridging device of sweet potato ridging shaping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 16 - 25. (in Chinese)
[28] 万里鹏程,李永磊,赵虎,等. 根茎类作物单摆铲栅收获装置渐变抛掷特性[J]. 农业工程学报, 2021, 37(24): 9 - 21.
WAN Lipengcheng, LI Yonglei, ZHAO Hu, et al. Gradient throwing characteristics of oscillating slat shovel for rhizome crop harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(24): 9 - 21. (in Chinese)
[29] 刘晓东,胡瑞,王登辉,等. 基于颗粒肥料运动模型的排肥器优化与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 85 - 95.
LIU Xiaodong, HU Rui, WANG Denghui, et al. Optimization and test of fertilizer apparatus based on granular fertilizer movement model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 85 - 95. (in Chinese)

(上接第 426 页)

[19] XIE C, ZHANG D, YANG L, et al. Experimental analysis on the variation law of sensor monitoring accuracy under different seeding speed and seeding spacing[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 189: 106369.
[20] 和贤桃,郝永亮,赵东岳,等. 玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(10):19 - 27.
HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and experiment of testing instrument for maize precision seed meter's performance detection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 19 - 27. (in Chinese)
[21] HE X, DING Y, ZHANG D, et al. Design and evaluation of PID electronic control system for seed meters for maize precision planting[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 28 - 33.
[22] 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.
[23] 张兆睿,黄玉祥,贾宪,等. 基于模糊 PID 的玉豆带状复合适速排种控制系统设计与试验[J]. 干旱地区农业研究,2024, 42(4):286 - 297.
ZHANG Zhaorui, HUANG Yuxiang, JIA Xian, et al. Design and testing of corn and soybean belt composite speed daptive seeding control system based on fuzzy PID[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(4): 286 - 297. (in Chinese)
[24] WANG S, YU Y, YANG C, et al. Experiment and research of seeding electromechanical control seeding system based on fuzzy control strategy[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2020, 38(1): 453 - 462.