doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.006

玉米双行交错种植播种机电机驱动控制系统设计与试验

肖跃进[1]　凌　琳[1,2]　孟志军[1]　刘　瑞[1]　武广伟[1]　李立伟[1]　董建军[1]　颜丙新[1]

(1.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097;2.西南大学工程技术学院,重庆 400716)

摘要:双行交错种植具有显著增产潜力,但现有装备普遍需依赖专用排种器,通用性和推广性不足;同时,当前电驱排种方式主要聚焦行内粒距控制,尚未有效适应双行交错农艺需求,限制了播种质量的提升。为此,本文基于现有排种器提出了一种基于主从电机固定转角差同步的双行交错种植控制方法,设计了一种玉米双行交错种植播种机控制系统。该系统采用 GNSS 测速,结合播种参数实时计算电机目标转速,并通过 CAN 总线下发至电机控制器,电机控制器采用磁场定向控制方法驱动永磁同步电机,从而实现行内粒距均匀性。同时,该系统基于电机主从跟踪控制方法实现主、从电机固定转角差的同步运动,保证行间交错排种。田间试验结果表明:系统在 3~12 km/h 作业速度和 20 cm 粒距条件下,行内粒距合格指数大于等于 92.48%,重播指数小于等于 0.78%,漏播指数小于等于 6.74%,变异系数小于等于 21.06%,各指标均优于 JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》播种质量要求;系统在 3~9 km/h 作业速度和 10 cm 交错粒距条件下,行间交错粒距合格指数大于等于 75.87%,重播指数小于等于 12.51%,漏播指数小于等于 11.62%,变异系数小于等于 25.14%。受高速下种子在导种管内的剧烈弹跳影响,12 km/h 作业速度下的交错播种质量显著下降,未能满足 JB/T 10293—2013 要求。该研究为玉米高效生产和播种装备智能化升级提供了坚实的技术支撑。

关键词:玉米;双行交错种植播种机;电驱控制系统;主从跟踪控制

中图分类号:S237　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0073-10　　**OSID**:

Design and Test of Motor-driven Control System for Maize Twin-row Staggered Planting Seeder

XIAO Yuejin[1]　LING Lin[1,2]　MENG Zhijun[1]　LIU Rui[1]　WU Guangwei[1]　LI Liwei[1]　DONG Jianjun[1]　YAN Bingxin[1]

(1. *Intelligent Equipment Research Center*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*
2. *College of Engineering and Technology*, *Southwest University*, *Chongqing* 400716, *China*)

Abstract: Although twin-row staggered planting offers significant yield-increasing potential, most existing equipment relies on specialized seed metering devices, which limits general applicability and large-scale adoption. Moreover, current motor-driven seed metering systems mainly focus on intra-row control and have not yet achieved effective integration with the agronomic requirements of double-row staggered planting, thereby limiting further improvements in sowing quality. To address these issues, an inter-row staggered planting control method was proposed based on a fixed phase difference synchronization of master-slave motors while utilizing existing seed metering devices, and an electric-driven double-row staggered corn planting system was designed. The system utilized GNSS-based speed measurement, calculated target motor speed based on planting parameters, and transmited commands to the motor controllers via CAN bus. Motor controllers employed field-oriented control (FOC) to drive permanent magnet synchronous motors, thereby achieving uniform intra-row seed spacing. Furthermore, a master-slave tracking control method enabled the two motors to operate synchronously with a fixed phase difference, ensuring inter-row staggered seeding. Field test results showed that, at operating speeds of 3~12 km/h and an intrarow spacing of 20 cm, the singlerow seed spacing qualified index was greater

收稿日期:2025-06-30　修回日期:2025-07-20

基金项目:北京市农林科学院改革与发展项目(GGFZ20250108)、国家自然科学基金项目(32301705)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-02)

作者简介:肖跃进(1995—),男,高级工程师,主要从事农业装备及其智能化研究,E-mail:xiaoyj@nercita.org.cn

通信作者:颜丙新(1988—),男,副研究员,博士,主要从事农业装备及其智能化研究,E-mail:ybx0122@126.com

than or equal to 92.48%, the multiple seeding index was less than or equal to 0.78%, the miss index was less than or equal to 6.74%, and the coefficient of variation was less than or equal to 21.06%; at operating speeds of 3 ~ 9 km/h and a twin-row stagger (offset) spacing of 10 cm, the qualified index was greater than or equal to 75.87%, the multiple seeding index was less than or equal to 12.51%, the miss index was less than or equal to 11.62%, and the coefficient of variation less than or equal to 25.14%. Due to severe seed bouncing inside the seed tube at high speed, the staggered seeding quality at 12 km/h declined markedly and failed to meet the seeding quality requirements of the industry standard JB/T 10293—2013 Technical Conditions for Single (Precision) Seed Drills. The research result can provide solid technical support for highyield and highefficiency maize production and the intelligent upgrading of seeding equipment.

Key words: maize; twin-row staggered planting seeder; motor-drive control system; master-slave tracking control

0 引言

现阶段,国内玉米生产仍以平作或垄作等传统模式为主[1-2]。尽管这些模式操作简便,但在田间空间利用和作物资源竞争方面存在不足,难以充分降低植株间的养分和光照竞争,影响群体的光合效率与产量的进一步提升[3-6]。传统方式下,土壤利用效率偏低已成为制约玉米高产稳产的重要因素之一。因此,探索更加高效的种植模式及配套技术,已成为提升玉米产量的重要方向。

近年来,双行交错种植模式受到广泛关注。该模式基于宽窄行配置,宽行间隔均匀,窄行内种子交错布置[2]。该方式有利于优化冠层光照分布和改善群体通风条件,提升作物的光合效率,保证产量[4,7-10]。已有多项研究证实,采用双行交错种植后,玉米植株的干物质积累和产量均有明显提升。德国 LEMKEN 公司与奥斯纳布吕克应用科学大学合作的试验指出,双行交错种植比等行距种植方式增产 4.5%[11]。李艳华等[12]的试验表明,该模式下玉米群体在播后 50 d 的干物质积累较单行等距模式提高 60% ~80%;张玉芹等[13]发现,其产量较等行距种植提升 13.1% ~13.8%。上述结果充分说明,双行交错种植有助于实现玉米高产高效的生产目标。

研究表明双行交错种植模式具有显著增产潜力,但其推广仍面临装配适配性和经济性等瓶颈。现有研究多集中于专用排种器的设计[14-17],李玉环等[17]设计了一种一器双行气吸式排种器,采用单风道单排种盘实现豆类的双行交错模式下的精量播种。孙文胜等[2]设计了双行交错气压式高速精量排种器,能够实现玉米作物的交错种植。CHEN 等[14]设计了双行交错气吸式排种器,并证明了双行相比单行排种器的能耗降低了 32%。然而,专用排种器更换和机具适配难度高,导致装备通用性和经济性不足,限制了新模式的推广应用。

目前,双行交错种植播种机多采用地轮驱动方式。地轮驱动方式存在地轮滑移和链条跳动等问题,排种均匀性难以保障,难以满足精准作业的需求[18-20]。相比之下,电驱排种技术因其排种精准、种子粒距调节灵活、单行独立控制等优势受到重视[20-21]。张春岭等[22]采用直流电机驱动排种器,以 PID 遗传算法控制电机转动,实现转速控制。田间试验表明,相较于地轮驱动排种方式,合格指数提高 3.63%。和贤桃等[23]通过编码器实现作业速度测量,并采用直流无刷电机作为排种器驱动装置,在对 PID 参数进行优化整定后,电驱动系统的响应时间达到 0.4s,超调量控制在 1.56% 以内,稳态误差控制在 0.75% 以内。DU 等[24]提出了一种基于磁场定向控制算法的电机驱动控制方法,显著提高了电驱排种器的播种效果,试验表明:采用此控制算法的电驱播种系统平均合格指数可达 98.85%。但整体来看,目前电驱系统多聚焦于行内粒距的精准控制,与双行交错农艺模式的适应性仍有提升空间,系统作业效果及智能化水平有待进一步完善。

针对上述问题,本研究基于现有排种器结构,提出一种基于主从电机固定转角差同步的玉米双行交错种植控制方法,并研制玉米双行交错种植控制系统。与需更换专用排种器或非双行交错作业的方案不同,本方法无需机构更换即可实现双行交错作业,可显著提升装备通用性和经济性。

1 控制系统方案设计

1.1 控制系统总体结构

为基于现有排种器实现交错种植模式,本文设计了玉米双行交错种植控制系统。如图 1 所示,该系统主要由主控制单元、机具提升状态检测单元和电驱播种控制单元构成。其中主控制单元包括安卓终端和 GNSS 天线;机具提升状态检测单元包括机具状态检测控制器和限位开关;电驱排种控制单元

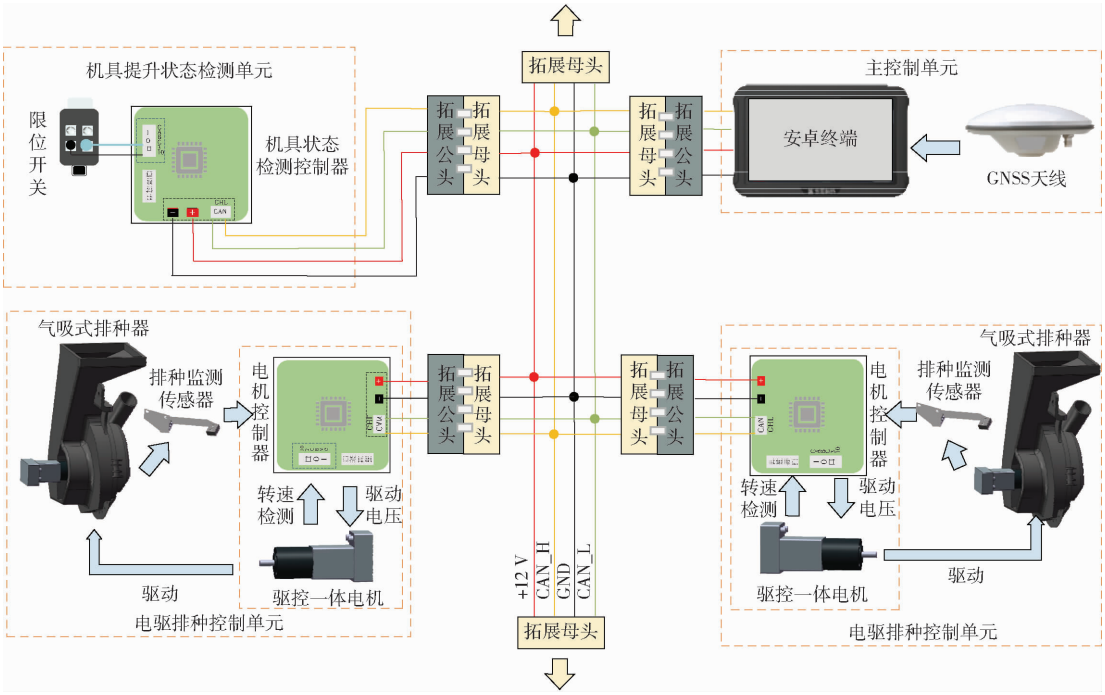


图 1　控制系统总体方案

Fig. 1　General scheme of control system

包括电机控制器、永磁同步电机、气吸式排种器和排种监测传感器。各单元间通过 CAN 总线实现数据交互，并借助拓展接头完成物理连接。

1.2　控制系统工作流程

控制系统工作流程如图 2 所示。机具状态检测控制器根据限位开关检测播种单体起落状态，判断机具提升状态，并将相关信息传输至 CAN 总线。安卓终端作为主控制器，通过内置板卡和外置 GNSS 天线，获取播种机具的作业速度，结合用户输入的播种参数计算电机目标转速，电机目标转速 R_m 计算公式为

$$R_m = \frac{5\,000vi}{3n_p d} \tag{1}$$

式中　v——作业速度，km/h

i——减速比

n_p——排种盘型孔数

d——播种粒距

随后，安卓终端接收机具提升状态，结合用户输入的电机启停状态，计算各电机状态，同时将电机目标转速下发至各电机控制器。电机控制器在获取电机目标转速、电机状态、电机实际转速等信息后，通过磁场定向控制算法对永磁同步电机转速进行控制，从而实现行内粒距精准控制。同时，电机控制器基于电机旋转角度和排种监测传感器触发信号获取主从电机旋转偏差角，采用改进主从控制方法，实现行间种子交错种植。

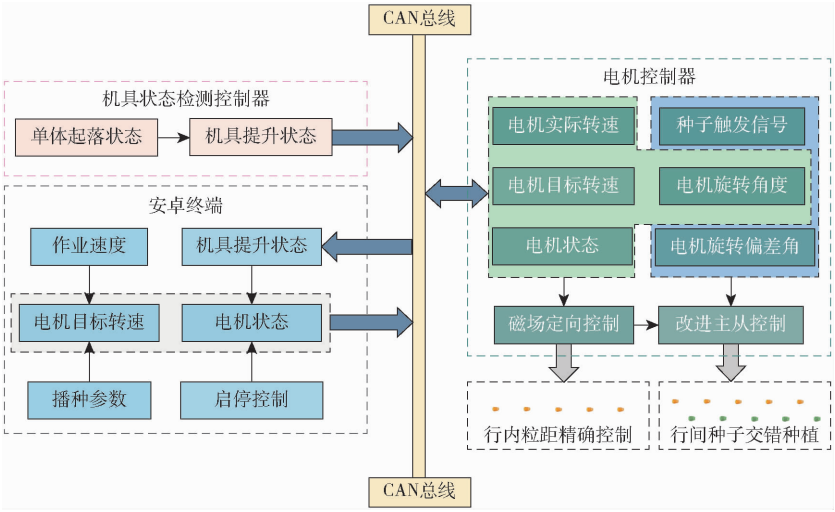


图 2　控制系统工作流程图

Fig. 2　Control system workflow diagram

2 控制系统工作原理

玉米双行交错种植控制系统在确保行内粒距均匀的基础上,实现行间交错种植。故其工作原理分为行内粒距控制方法与行间交错种植控制方法。

2.1 行内粒距控制方法

行内粒距控制以磁场定向控制方法为核心,实现行内粒距均匀一致。

2.1.1 磁场定向控制方法

磁场定向控制方法的核心思路是将电机中的三相电流由 a、b、c 三相旋转坐标系先经 Clarke 变换至 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系,再进一步经 Park 变换至 dq 两相旋转坐标系中。一系列变换后,定子电流矢量就可以被分解为两个独立且垂直的分量,即励磁电流分量 I_d和转矩电流分量 I_q,通过分别控制这两个分量,从而实现对电机转速的精准调节。

磁场定向转速控制算法框图如图 3 所示,其工作流程为:计算电机实际转速,与目标转速进行对比,将误差输入 PI 控制器,PI 控制器输出作为转矩电流分量 I_{q_ref}的目标值,励磁电流分量 I_{d_ref}的目标值设为 0(不调整磁链,提高能量利用率);采集电机的三相电流 I_a、I_b和 I_c,经 Clarke 变换和 Park 变换得到旋转坐标系下电机实际正交电流 I_q和 I_d;将两种电流分量实际值与目标值的误差输入 PI 控制器,PI 控制器输出施加在电机上的电压矢量 U_q和 U_d;利用测定的转子实时电角度 θ_e,将电压 U_q和 U_d经反 Park 变换得到两相静止坐标系下的电压分量 U_α、U_β;再通过空间电压脉宽调制(SVPWM)生成对应的三相信号,施加于电机,实现对电机的高效驱动和精确控制[25]。

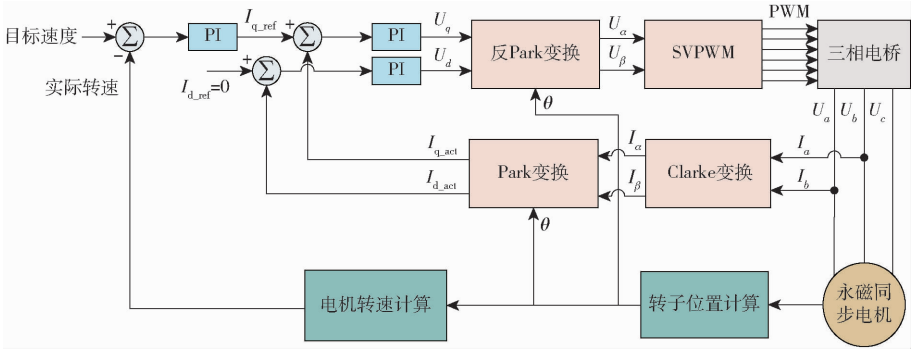


图 3 磁场定向转速控制算法框图

Fig. 3 Block diagram of field-oriented speed control algorithm

2.1.2 PI 调节与参数

控制器参数调整通过 PI 控制方法完成,以实现永磁同步电机的实时精确驱动。具体采用电流环与转速环组成的双闭环控制策略。

(1)电流环调节

电流环中使用 PI 控制器分别调节电流分量 I_d和 I_q。由于电机的电磁时间常数明显小于机械时间常数,因此可以将电流环简化为一阶系统,即电流环等效为一阶惯性环节。

$d-q$ 轴电压为

$$\begin{cases} u_d^* = \left(K_{pd} + \dfrac{K_{id}}{s}\right)(i_d^* - i_d) - \omega_e L_q i_q \\ u_q^* = \left(K_{pq} + \dfrac{K_{iq}}{s}\right)(i_q^* - i_q) + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \tag{2}$$

式中 u_d^*、u_q^*——$d-q$ 轴电压目标值,V

K_{pd}、K_{pq}——$d-q$ 轴比例系数

K_{id}、K_{iq}——$d-q$ 轴积分系数

i_d^*、i_q^*——$d-q$ 轴电流目标值,A

i_d、i_q——$d-q$ 轴电流实际值,A

L_d、L_q——$d-q$ 轴电感分量,H

ω_e——电角速度,rad/s

ψ_f——永磁体磁链,Wb

PI 调节参数为

$$\begin{cases} K_{pd} = \alpha_b L_d \\ K_{id} = \alpha_b R \\ K_{pq} = \alpha_b L_q \\ K_{iq} = \alpha_b R \end{cases} \tag{3}$$

式中 R——电阻,Ω

α_b——电流环控制带宽,Hz

(2)转速环调节

三相永磁同步电机的运动方程为

$$\begin{cases} J\dot{\omega}_m = T_e - T_l - B\omega_m \\ T_e = \dfrac{3}{2} p_n i_q [i_d (L_d - L_q) + \psi_f] \end{cases} \tag{4}$$

式中 J——电机转动惯量,kg·m^2

ω_m——电机机械角速度,rad/s

T_e——电机输出转矩,N·m

T_l——负载转矩,N·m

B——阻尼系数

p_n——电机极对数

采用 PI 调节器，电机转速环控制器表达式为

$$i_q^* = \left(K_{p\omega} + \frac{K_{i\omega}}{s}\right)(\omega_m^* - \omega_m) - B_a\omega_m \tag{5}$$

式中　$K_{p\omega}$——PI 控制器比例系数

$K_{i\omega}$——PI 控制器积分系数

ω_m^*——电机目标机械角速度，rad/s

B_a——有功阻尼系数

因此，PI 调节器参数 $K_{p\omega}$、$K_{i\omega}$可整定为

$$\begin{cases} K_{p\omega} = \dfrac{\beta_f J}{1.5 p_n \psi_f} \\ K_{i\omega} = \beta_f K_{p\omega} \end{cases} \tag{6}$$

式中　β_f——转速环期望的频带带宽，Hz

2.2　行间交错种植控制方法

行间交错种植过程中需先获取排种初始转角，再根据交错种植模式的特点计算固定转角差，并进一步确定电机旋转偏差角，最终通过主从电机跟踪控制方法实现相邻排种盘交替排种的目的。

2.2.1　排种初始转角获取

由于无法直接获取排种盘的绝对角度，排种初始转角通过排种监测传感器与磁编码器联合获取。在排种器充种阶段，电机以缓慢速度旋转，控制器通过磁编码器实时获取主从电机转角，并根据减速比计算排种盘转角。当前 3 粒种子投出并被排种监测传感器感应到时，记录对应的排种盘旋转角度，分别记为 α_1、α_2、α_3。3 个角度取平均值作为排种盘排种初始转角 φ。各角度对应关系如图 4 所示。

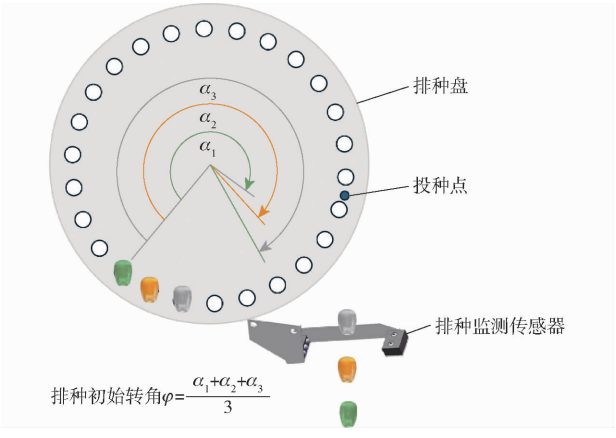


图 4　排种初始转角获取

Fig. 4　Acquisition of initial points for seeding

2.2.2　电机旋转偏差角计算

播种作业时，排种器排种偏差角为

$$E(t) = \chi_m(t) - \chi_s(t) + \Delta\theta \tag{7}$$

其中

$$\Delta\theta = \varphi_1 - \varphi_2 - \frac{\pi\beta}{n_p} \tag{8}$$

式中　$E(t)$——排种器排种偏差角，rad

$\chi_m(t)$、$\chi_s(t)$——主、从电机对应排种盘旋转角度，rad

φ_1、φ_2——主、从电机对应排种盘排种初始转角，rad

$\Delta\theta$——排种盘固定转角差

β——行间播种方式系数，$\beta=0$ 为行间平行播种，$\beta=1$ 为行间交错播种

排种盘固定转角差 $\Delta\theta$ 由主从排种盘初始转角偏差与交错角组成。主从排种盘初始转角偏差用于补偿两排种盘在机械安装中的差异，确保控制基准一致。后者为理想交错排布所需，设置为排种盘相邻型孔间夹角的一半（π/n_p），以保证两排种盘的型孔投影交错，从而保障行间交错排种。行间播种方式系数 β 用于切换不同播种模式。

最终，该角度差用于主从电机同步控制，其对应的电机旋转偏差角为

$$E_m(t) = iE(t) \tag{9}$$

2.2.3　主从电机跟踪控制方法

在双行交错种植过程中，为实现行内粒距一致与行间粒距交错，提出了一种基于主从电机固定转角差同步的排种控制方法，控制原理如图 5 所示。图中 ω_T为电机目标角速度，rad/s；ω_m、ω_s为主从电机实际角速度，rad/s。

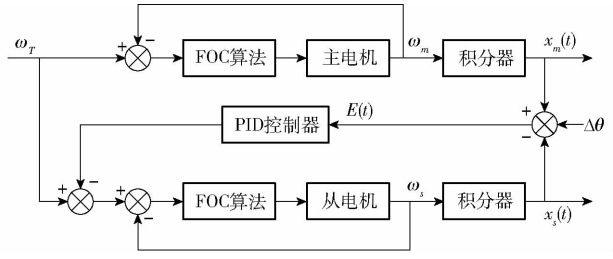


图 5　电机跟踪控制原理图

Fig. 5　Motor tracking control principle diagram

该方法中，主电机采用磁场定向控制（FOC）算法进行转速闭环控制，并通过积分器实时输出主电机旋转角度 $\chi_m(t)$。从电机在获取主电机旋转角度 $\chi_m(t)$与自身旋转角度 $\chi_s(t)$后，计算电机旋转偏差角 $E_m(t)$，作为 PID 控制器的输入，调整从电机的目标转速，实现主从电机固定转角差同步转速控制，从而确保排种盘的交错排种。针对作业过程中从电机跟踪主电机时易产生控制滞后的问题，在从电机控制环节中引入主电机目标转速 ω_T作为参考，有效降低了因主电机转速变化导致的从电机跟踪滞后。

该控制方法也可延伸至一主多从方式，通过调整从机的行间播种方式系数 β，实现全幅宽内排种器交错排种。

3　控制系统设计

3.1　硬件设计

基于系统组成和工作原理，设计了电机控制器

硬件电路。如图 6 所示,硬件电路包括:单片机电路、电机驱动电路、排种监测信号采集电路、磁编码器电路、相电流调理电路、CAN 总线电路以及电源电路。

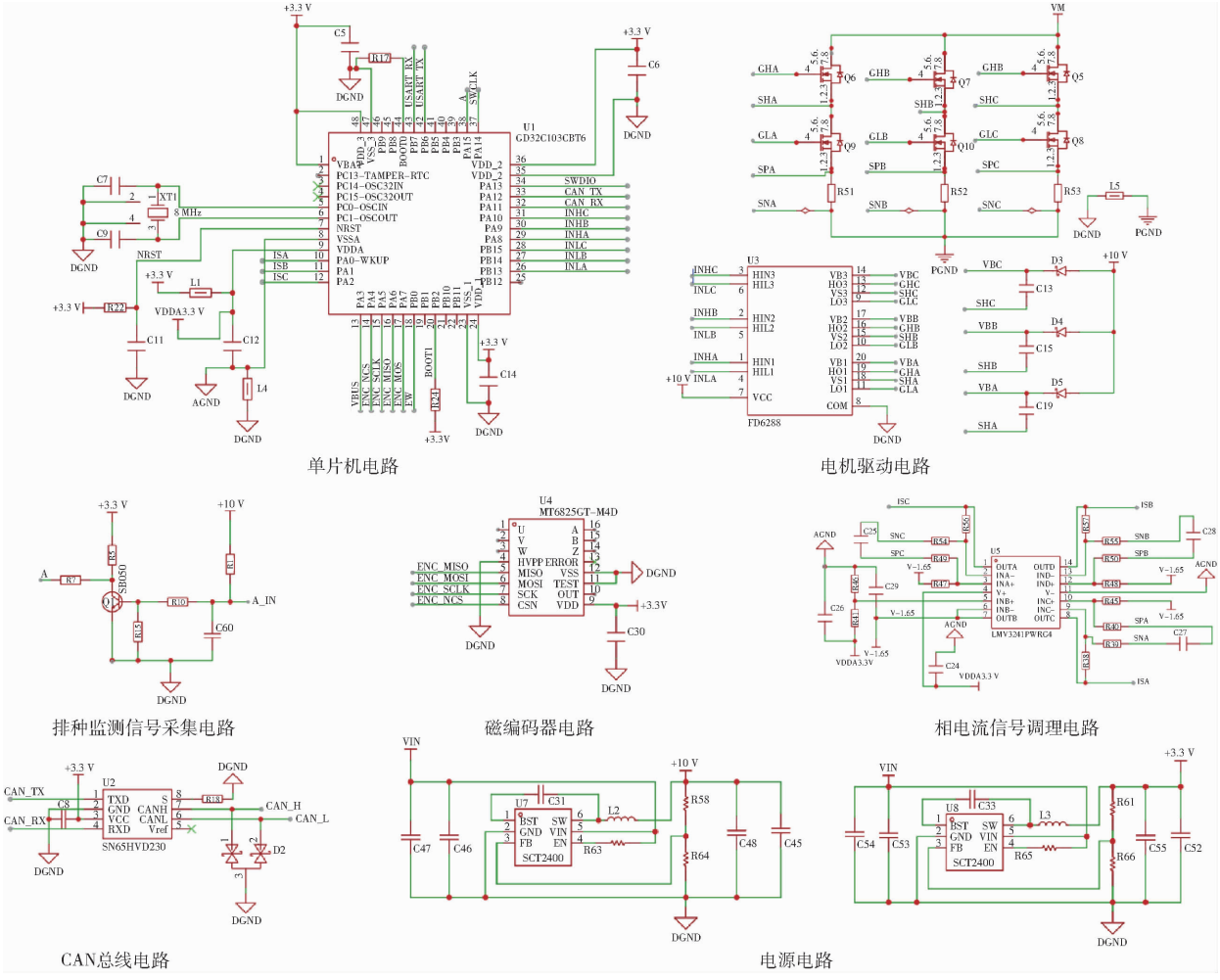


图 6 玉米双行交错种植播种机控制系统硬件电路

Fig. 6 Hardware circuit of control system for maize twin-row staggered planting seeder

3.1.1 单片机电路

单片机(MCU)电路是控制系统的核心部件,其负责接收控制指令、处理数据、驱动电机等功能。所选用的 MCU 芯片为兆易创新公司生产的 GD32C103CBT6,芯片主频为 120 MHz,并集成 FPU 运算单元,可满足 FOC 空间矢量变换和多闭环 PID 控制等高性能实时运算的要求。

3.1.2 电机驱动电路

该电路基于三相全桥逆变结构,由 6 个 N 沟道 MOSFET(Q5 – Q10)组成三相功率桥,用于对永磁同步电机三相绕组进行高效驱动。三相桥臂的栅极由驱动芯片 FD6288(深圳市富鼎微电子有限公司生产)进行控制,驱动芯片的输入端接收单片机输出的 PWM 控制信号,从而实现对永磁同步电机的启停、正反转、无级调速控制。为提升系统的安全性与闭环性能,电路在每一相桥下端均串联分流电阻(R51 – R53),用于实时采样三相电流,用于过流保护及电流环反馈调节。

3.1.3 排种监测信号采集电路

该电路将排种监测传感器输出的集电极开漏信号转换为单片机 IO 可接受的 3.3 V 数字电平信号。通过 NPN 三极管(Q1)及上拉电阻(R5),实现信号的缓冲与隔离,增强系统的抗干扰能力并有效保护单片机 IO 口。R10 与 C60 组成低通滤波电路,用于抑制高频噪声,提高信号的稳定性。R1 为上拉电阻,确保信号处于明确电平状态。整体电路兼具电平整形、滤波及保护功能,提升了信号质量与系统可靠性。

3.1.4 磁编码器电路

该电路基于明导科技生产磁编码器芯片 MT6825GT – M4D 设计,主要用于采集永磁同步电机的位置信号,并通过 SPI 接口与主控芯片进行数据交换。芯片采用 3.3 V 供电,电源端并联 100 nF 电容(C30)去耦,增强电源稳定性并抑制高频噪声干扰。

3.1.5 相电流信号调理电路

该电路用于三相永磁同步电机的相电流信号采集与调理。电流信号首先经采样电阻转换为电压信

号，经 RC 滤波网络抑制高频噪声后，输入运算放大器 LMV324IPWRG4（美国德州仪器公司生产），进行差分放大与 1.65 V 电平偏置，最终输出至控制器 ADC 接口。该设计能够有效提升电流采样的抗干扰能力和精度，为电机矢量控制和电流保护提供可靠的信号基础。

3.1.6　CAN 总线电路

该电路基于美国德州仪器公司生产的 SN65HVD230 芯片设计，实现控制系统与 CAN 总线间的双向数据传输。CAN_TX 与 CAN_RX 分别接单片机的发送与接收引脚，芯片将逻辑信号转换为差分信号并通过 CAN_H 与 CAN_L 发送至总线；反向亦然。同时在 CAN 总线端配置了 TVS 二极管阵列（D1、D2）用于静电和浪涌保护。

3.1.7　电源电路

栅极驱动芯片和外部传感器需要的电源工作区间为 8 ~ 12 V，采用 10 V 电源；编码器芯片、单片机、串口转换、运算放大器等电路系统芯片工作电压为 3.3 V。因此，设计电源电路为系统提供 3.3 V 和 10 V 两种电压。选用两片 SCT2400 DC－DC 数字电源芯片（芯洲科技）作为电路模块的供电芯片，提供 3.3 V 和 10 V 两种电压。

机具状态检测控制器则复用了电机控制器，通过检测与接近开关连接的 IO 口高低电平状态，判断播种单体起落状态，进而获取播种机的提升情况。

3.2　软件设计

依据硬件电路设计选型与播种机控制系统工作原理，设计了玉米双行交错种植播种机控制系统软件。采用 Android studio 作为安卓终端开发环境，采用 Java 语言进行开发终端软件。选用 Keil μVision 5 作为电机控制器开发环境，采用 C 语言进行编程。在此基础上，设计了控制系统软件流程，如图 7 所示。

4　试验与结果分析

为验证双行交错种植播种机控制系统的有效性，开展了田间试验，并对行内粒距均匀性和行间粒

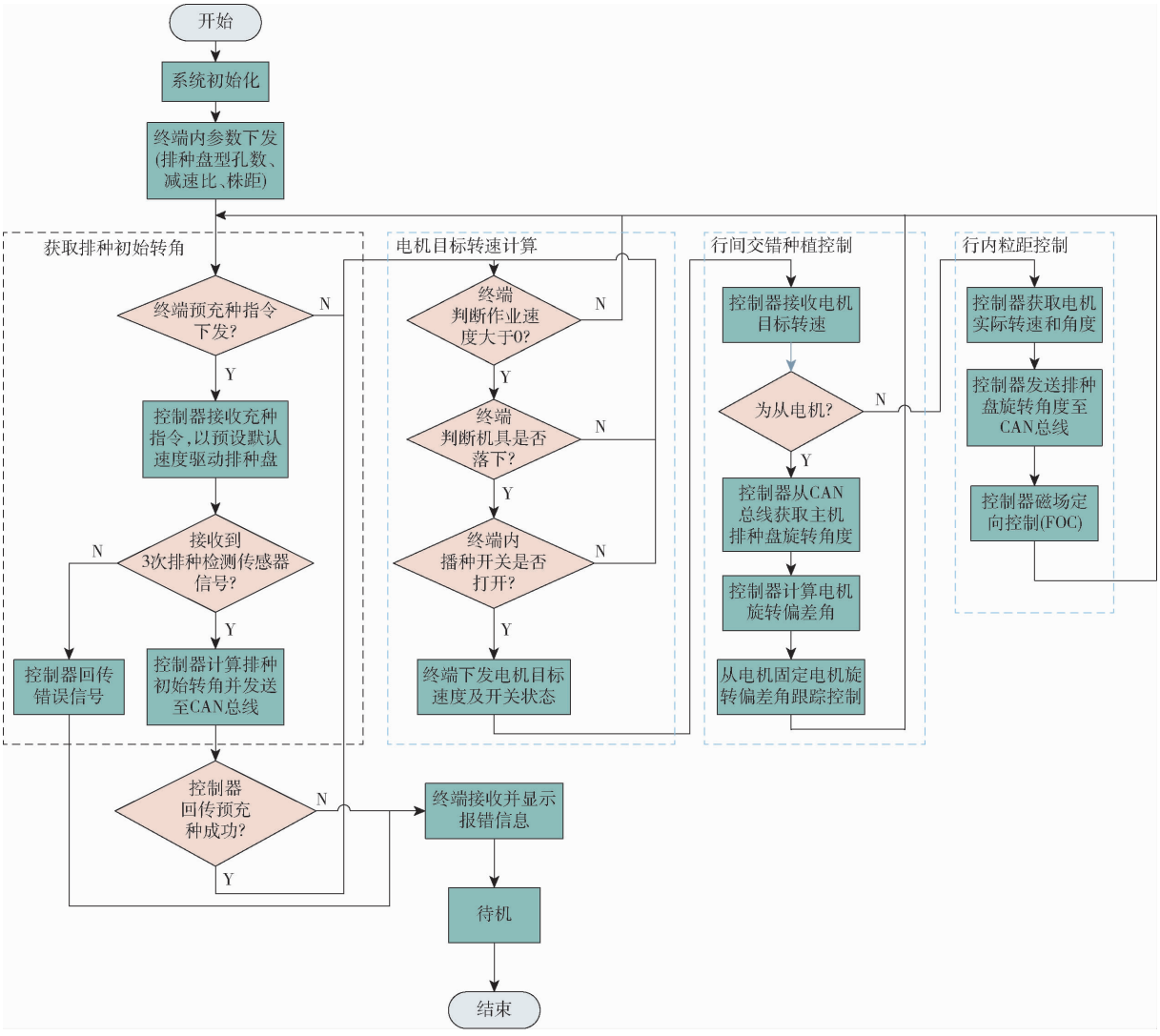


图 7　玉米双行交错种植播种机控制系统软件流程图

Fig. 7　Software process of control system for maize twin-row staggered planting seeder

距均匀性进行了评估。

4.1 试验材料

试验于 2025 年 7 月在北京市小汤山镇国家精准农业研究示范基地开展。试验地块土壤类型为棕壤,试验前对地块进行了旋耕作业。研制的控制系统安装于农芯科技(北京)有限公司生产的 2BMQ－8 型气吸式精量播种机上。该播种机采用宽窄行布置,窄行 40 cm,宽行 80 cm。玉米品种选用北京市农林科学院玉米研究中心选育的 NK815,种子呈半马齿形,千粒质量为 326 g。试验使用 Case IH 2104 型拖拉机为播种机提供动力,拖拉机与播种机采用三点悬挂相连接。试验设备如图 8 所示。

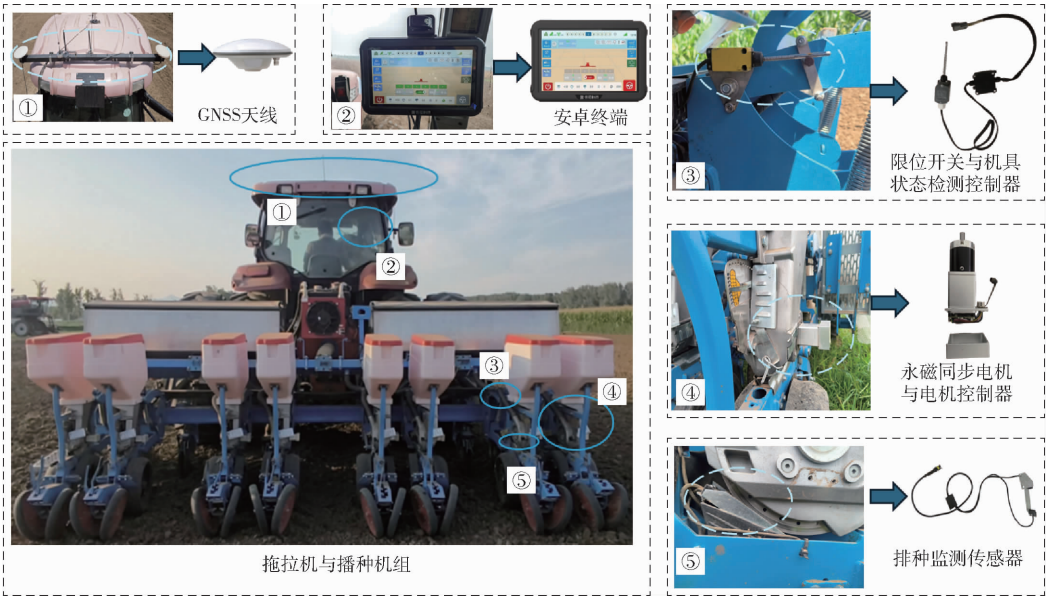


图 8 试验设备

Fig. 8 Test equipment

4.2 试验方法

为研究不同作业速度下播种机双行交错播种效果,基于 10 cm 交错粒距(单行 20 cm 粒距),分别在 3、6、9、12 km/h 4 个速度水平下开展双行交错种植试验,每个速度水平采集 4 组(宽 + 窄行)粒距数据。

试验前,调节拖拉机 PTO 转速,维持风机风压在 －6 kPa;通过控制终端将所有排种驱动电机粒距参数配置为 20 cm。试验时,为保证机具在实际作业区达到预设速度,在地头处设置 20 m 准备区;单次试验结束后,挖出种子检查播种情况,如图 9 所示,使用标记卡进行位置标记,按照播种单体行号记录每行中单个种子在长卷尺上对应的刻度信息,每行检测长度不少于 75 个种子间距。

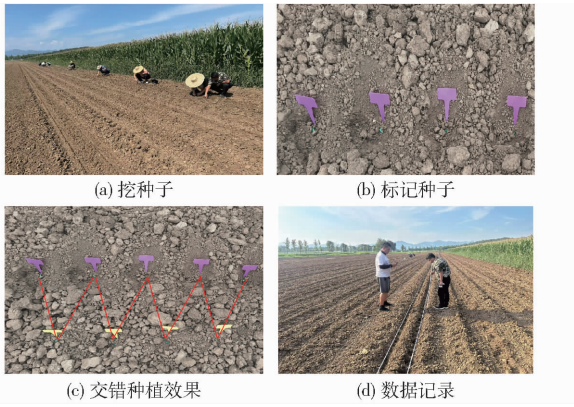


图 9 试验过程

Fig. 9 Test process

4.3 评价指标

交错种植是在确保单行粒距均匀性的基础上实现的,因此试验评价指标采用行内粒距均匀性和行间交错种植均匀性两类指标进行综合评估。

4.3.1 行内粒距均匀性指标

行内粒距均匀性指标参考 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,计算合格指数、漏播指数、重播指数、变异系数 4 个指标。同时,参考 JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》对各指标进行评估。

4.3.2 行间交错种植均匀性指标

因目前针对种子双行交错种植模式的性能指标评估缺乏相应的标准,故提出一种针对双行交错种植效果的性能指标评估方法。以两行为一组,取一行为基准,另一行种子投影至基准行,投影行中种子目标粒距则为原目标播种粒距的一半,以投影行种子粒距为基础,参考 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》对投影行粒距进行处理,采用合格指数、重播指数、漏播指数、变异系数对双行交错种植进行性能评估,性能指标计算思路如图 10 所示。交错种植模式下合格指数越高,说明符合交错

种植模式的种子越多；变异系数则反映了交错模式下的合格粒距均匀情况。同时，参考 JB/T 10293—2013《单粒（精密）播种机技术条件》对双行交错种植精度进行衡量。

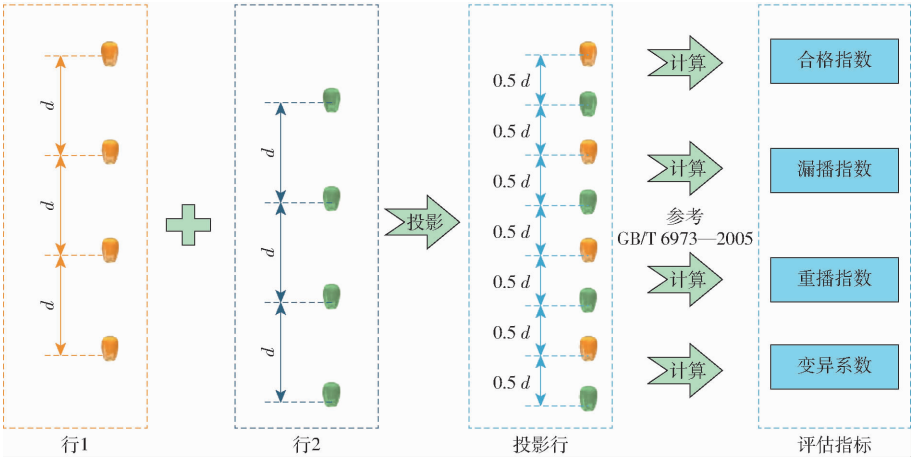


图 10　双行交错种植模式评价指标计算示意图

Fig. 10　Schematic calculation of evaluation indexes for double row staggered planting pattern

4.4　试验结果与分析

4.4.1　行内粒距均匀性结果

在评估控制系统的双行交错播种效果前，首先对单行粒距均匀性进行评估。不同作业速度条件下行内粒距均匀性如图 11 所示。图中虚线对应 JB/T 10293—2013 的质量指标要求。

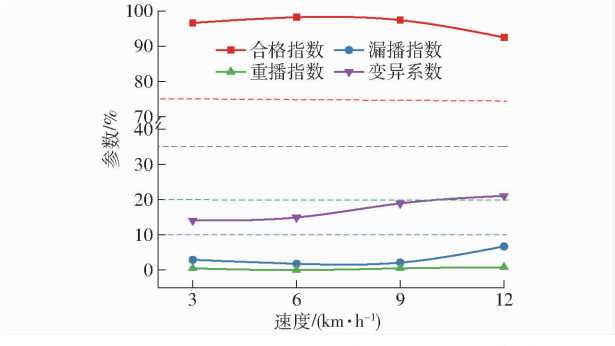


图 11　行内粒距均匀性指标随速度变化曲线

Fig. 11　Variation curves of seed spacing uniformity index with operating speed within rows

随着作业速度由 3 km/h 提升至 12 km/h，合格指数先上升后下降。重播指数与漏播指数则先降低后升高。变异系数则总体呈上升趋势，变异系数最大值为 21.06%。

总体而言，行内粒距在不同速度下的合格指数不低于 92.48%，重播指数不高于 0.78%，漏播指数不高于 6.74%，变异系数不高于 21.06%。各项指标均优于 JB/T 10293—2013《单粒（精密）播种机技术条件》中对播种质量的要求，表明系统保持较高的播种均匀性。

4.4.2　行间交错种植均匀性结果

不同作业速度条件下行间交错粒距均匀性如图 12 所示。图中虚线对应 JB/T 10293—2013 的质量指标要求。该结果表明，随着作业速度增加，交错种植合格指数总体呈下降趋势，交错种植重播指数、交错种植漏播指数、交错种植变异系数均总体呈上升趋势。

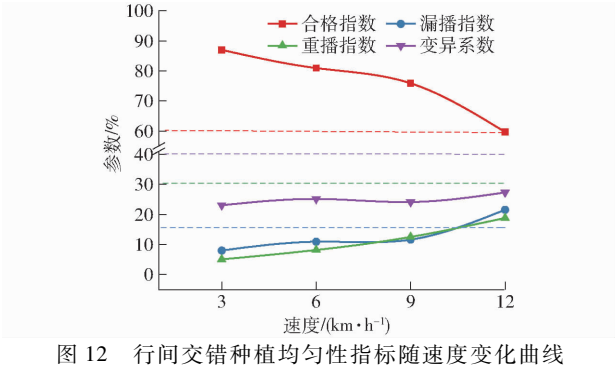


图 12　行间交错种植均匀性指标随速度变化曲线

Fig. 12　Variation curves of inter-row staggered planting uniformity index with operating speed

在 9 km/h 速度内，各指标均优于 JB/T 10293—2013 要求，合格指数高于 75.87%，重播指数低于 12.51%，漏播指数低于 11.62%，变异系数低于 25.14%。

系统在 12 km/h 下合格指数为 59.65%，重播指数为 18.80%，漏播指数为 21.55%，变异系数为 27.30%。其中合格指数与漏播指数均略差于 JB/T 10293—2013《单粒（精密）播种机技术条件》中对播种质量的要求。

行间均匀性指标相较于行内均匀性指标存在明显劣化的情况，这可能与粒距变化和振动有关。行内目标粒距为 20 cm，参照 GB/T 6973—2005 的粒距合格范围为 10 ~ 30 cm。而双行交错下的目标粒距则为 10 cm，粒距合格范围为 5 ~ 15 cm。粒距降低，相应地粒距合格范围也变小，因此种子在管内和种沟中的弹跳对粒距的影响更为显著。故行间粒距均匀性整体要差于行间粒距均匀性。同时，速度增加会导致播种单体振幅提升，导致种子弹跳剧

烈[26]。振动导致的种子弹跳会对小粒距产生更大的影响,这也可以解释行间粒距均匀性在 12 km/h 显著变低。未来可考虑与带式导种装置、压种装置结合,通过带式导种装置提高导种过程中的粒距均匀性,通过压种装置降低种子在种沟内的弹跳。

5 结论

(1)提出了一种基于主从电机固定转角差同步的双行交错种植控制方法,实现了行内粒距均匀性与行间种子交错排布的协同优化,有效解决了双行交错种植播种机依赖专用排种器的问题,提升了玉米双行交错种植的农艺适应性。

(2)研制了一种基于 GNSS 测速、CAN 总线架构和电机驱动的玉米双行交错种植播种机控制系统,设计并实现了控制器的硬件电路与软件流程。

(3)田间试验结果表明,系统在 3 ~ 12 km/h 作业速度和 20 cm 粒距下,行内粒距各指标均优于 JB/T 10293—2013 要求。在 3 ~ 9 km/h 作业速度和 10 cm 交错粒距条件下,行间交错粒距性能指标满足 JB/T 10293—2013 要求。12 km/h 下因种子剧烈弹跳而未能达标,未来可通过带式导种装置与压种装置对导种与种子入土过程进行约束,以提高交错种植效果。

(4)本系统有效提升了双行交错种植装备的适配性和智能化水平,为玉米高产高效种植模式的推广及播种装备智能升级提供了有力技术支撑。未来可进一步拓展系统的多作物适应性与自适应控制能力,以推动智能农业装备的持续发展。

参 考 文 献

[1] 刘瑞, 刘云强, 刘忠军, 等. 玉米高速精量播种机正压气流辅助吹送导种装置研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 156 – 166.
LIU Rui, LIU Yunqiang, LIU Zhongjun, et al. Research on positive pressure airflow assisted blowing and seed guiding device of corn high-speed precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 156 – 166. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 王庆杰, 李洪文, 何进, 等. 大垄宽窄行免耕种植对土壤水分和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 39 – 43.
WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Effects of wide-ridge and narrow-row no-till cultivation on soil water and maize yield[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 39 – 43. (in Chinese)

[4] TANG L, SONG J, CUI Y, et al. Research progress on a wide and narrow row cropping system for crops[J]. Agronomy, 2025, 15(1): 248.

[5] FENG L, RAZA M A, CHEN Y, et al. Narrow-wide row planting pattern improves the light environment and seed yields of intercrop species in relay intercropping system[J]. PLOS ONE, 2019, 14(2): e0212885.

[6] MADDONNI G A, OTEGUI M E. Intra-specific competition in maize: early establishment of hierarchies among plants affects final kernel set[J]. Field Crops Research, 2004, 85(1): 1 – 13.

[7] ROBLES M, CIAMPITTI I A, VYN T J. Responses of maize hybrids to twin-row spatial arrangement at multiple plant densities [J]. Agronomy Journal, 2012, 104(6): 1747 – 1756.

[8] WANG W, ZHANG S, LI J, et al. Effects of the twin-row planter with subsoiling on soybean growth and yield in northern China [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2022, 53(3): 1359.

[9] WANG R, CHENG T, HU L. Effect of wide-narrow row arrangement and plant density on yield and radiation use efficiency of mechanized direct-seeded canola in Central China[J]. Field Crops Research, 2015, 172: 42 – 52.

[10] HUANG S, GAO Y, LI Y, et al. Influence of plant architecture on maize physiology and yield in the Heilonggang River valley [J]. The Crop Journal, 2017, 5(1): 52 – 62.

[11] Lemken. Practical Trial[EB/OL]. [2025 – 06 – 22]. http://www.lemken.com/en-en/agricultural-machines/sowing/precision-seeding/azurit/practical-trial.

[12] 李艳华, 张鹏, 吴国良, 等. “双行交错”种植方式玉米干物质积累动态变化的研究[J]. 山东农业科学, 2011(6): 35 – 38.
LI Yanhua, ZHANG Peng, WU Guoliang, et al. Research on dynamic variation of dry matter accumulation in maize cultivated by “double-row interlaced planting” method[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2011(6): 35 – 38. (in Chinese)

[13] 张玉芹, 杨恒山, 李从锋, 等. 条带耕作错位种植对灌区春玉米产量形成与冠根特征的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(6): 902 – 913.
ZHANG Yuqin, YANG Hengshan, LI Congfeng, et al. Effects of strip-till with staggered planting on yield formation and shoot-root characteristics of spring maize in irrigation area of Xiliaohe plain[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(6): 902 – 913. (in Chinese)

(下转第 163 页)

Agricultural University, 2020. (in Chinese)
[22] 吴宝山. 基于北斗/GPS 双模差分定位的播种机作业状态监测系统[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2018.
WU Baoshan. Planter state monitoring system based on Beidou/GPS dual mode differential positioning[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[23] ZHAO J, WANG X, TIAN H, et al. A fertilizer discharge detection system based on point cloud data and an efficient volume conversion algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021,185:106131.
[24] ZHANG Y, ZHANG K, YU Y, et al. Remnant fertilizer monitoring system for maize fertilizer applicators[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023,16(5):181 - 188.
[25] 张甜, 蒋乐, 李兆东, 等. 光纤计数式油菜精量排种器种子流检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2023,54(1):64 - 74, 145.
ZHANG Tian, JIANG Le, LI Zhaodong, et al. Seed flow detection system of optical fiber counting rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(1):64 - 74, 145. (in Chinese)
[26] 丁幼春, 王雪玲, 廖庆喜. 基于时变窗口的油菜精量排种器漏播实时检测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 11 - 21.
DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi. Method of real-time loss sowing detection for rapeseed precision metering device based on time changed window[J]. Transactions of CSAE, 2014, 30(24): 11 - 21. (in Chinese)
[27] 孙永佳, 沈景新, 窦青青, 等. 基于 Cortex - M3 的免耕播种机监控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018,49(8): 50 - 58.
SUN Yongjia, SHEN Jingxin, DOU Qingqing, et al. Design and test of monitoring system of no-tillage planter based on Cortex - M3 processor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(8):50 - 58. (in Chinese)

(上接第 82 页)

[14] CHEN J, GUAN T, YUAN Z, et al. Development of high-speed precision maize metering device for dense planting pattern with standard ridges[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15:1452699.
[15] LI Y, BAI Y, ZHANG X, et al. Structural design and simulation analysis of a dual-row pneumatic vegetable precision planter [J]. Processes, 2023, 11(6): 1803.
[16] 衣淑娟, 张淯朋, 戴智博, 等. 玉米品字形高速精量播种机正压气流导槽式导种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 261 - 274.
YI Shujuan, ZHANG Yupeng, DAI Zhibo, et al. Design and experiment of positive pressure airflow guide groove seed guiding device for maize delta-row high-speed precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(2):261 - 274. (in Chinese)
[17] 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)
[18] YANG L, HE X, CUI T, et al. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(4): 1 - 9.
[19] LING L, LI H, XIAO Y, et al. Study on seeding delay time and lag distance of automatic section control system for maize seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110068.
[20] LING L, WU G, WEN C, et al. Influence of speed measurement method on performance of an electric-drive maize precision planter[J]. Biosystems Engineering, 2024, 238: 175 - 187.
[21] LING L, XIAO Y, HUANG X, et al. Design and testing of electric drive system for maize precision seeder[J]. Agriculture, 2024, 14(10): 1778.
[22] 张春岭, 吴荣, 陈黎卿. 电控玉米排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 51 - 59.
ZHANG Chunling, WU Rong, CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):51 - 59. (in Chinese)
[23] 和贤桃, 丁友强, 张东兴, 等. 玉米精量排种器电驱 PID 控制系统设计与性能评价(英文)[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 28 - 33.
HE Xiantao, DING Youqiang, ZHANG Dongxing, 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.
[24] DU Z, YANG L, ZHANG D, et al. Development and testing of a motor drive and control unit based on the field-oriented control algorithm for the seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 108024.
[25] MOHANRAJ D, ARULDAVID R, VERMA R, et al. A review of BLDC motor: state of art, advanced control techniques, and applications[J]. IEEE Access, 2022, 10: 54833 - 54869.
[26] ZHAI C, LONG J, TAYLOR R, et al. Field scale row unit vibration affecting planting quality[J]. Precision Agriculture, 2020, 21(3): 589 - 602.