

基于北斗导航的大蒜无人播种机设计与试验

李天华^{1,2} 孙学腾¹ 施国英^{1,2} 崇峻³ 耿爱军^{1,2} 沈永帅³

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省设施园艺智慧生产技术装备重点实验室, 泰安 271018;
3. 济南华庆农业机械科技有限公司, 济南 251604)

摘要: 针对大蒜播种过程中单粒正头播种合格率低、人工驾驶易疲劳、播后整齐度差等问题,设计了一种基于北斗高精度导航的履带式大蒜无人播种机。整机系统由驱动底盘、勺链式取种装置、三级调向正头装置、离合插播装置及控制系统构成,通过北斗 RTK/INS 融合定位技术实现厘米级路径跟踪,结合端点坐标自标定与全局路径规划算法完成无人化自主作业。为提高播种精度,取种装置采用弧形腔体勺链结构,确保单粒取种率;正头装置采用内壁曲面逐级变化的三级料斗构成,蒜种经“平铺-倾斜-直立”调整后,以鳞芽朝上的直立状态落入插播鸭嘴;为实现导航与播种的高效协同,设计了气缸离合机构,基于实时位姿反馈,控制插播装置启停与压实轮升降,确保转弯调头时播种作业及时中断与恢复。为验证样机性能,进行了田间试验,结果表明,播种机在 0.1 m/s 的典型播种速度下直线行走 50 m 时,导航绝对偏移量最大值、最小值分别为 32.1、0.44 mm,平均值为 11.8 mm;转弯调头作业路径最大、最小绝对偏差分别为 40.5、13.5 mm,平均绝对偏差为 25.4 mm;平均正芽率、漏播率及重播率分别为 95.7%、1.7%、2.2%,满足大田规模化种植的技术需求。

关键词: 大蒜; 播种机; 无人化; 北斗导航

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)19-0194-09 OSID: 

Design and Testing of Unmanned Garlic Seeder Based on Beidou Navigation

Li Tianhua^{1,2} Sun Xueting¹ Shi Guoying^{1,2} Chong Jun³ Geng Aijun^{1,2} Shen Yongshuai³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China
2. Shandong Key Laboratory of Intelligent Production Technology and Equipment for Facility Horticulture, Tai'an 271018, China
3. Jinan Huaqing Agricultural Machinery Technology Co., Ltd., Ji'nan 251604, China)

Abstract: Aiming at the problems of low qualified rate of single seed head seeding, fatigue of manual driving and poor uniformity after sowing in garlic sowing process, a crawler-type garlic unmanned seeder based on Beidou high-precision navigation was designed. The whole machine system consisted of a driving chassis, a spoon chain seed taking device, a three-level direction adjustment head device, a clutch insertion device and a control system. The centimeter-level path tracking was realized through Beidou RTK/INS fusion positioning technology, and the unmanned autonomous operation was completed by combining the endpoint coordinate self-calibration and global path planning algorithm. In order to improve the sowing accuracy, the seed taking device adopted an arc cavity spoon chain structure to ensure the single seed taking rate; the head device adopted a three-level hopper with a step-by-step change of the inner wall surface. After the garlic seeds were adjusted from “flat – tilted – upright”, they fell into the insertion duckbill in an upright state with the phosphorus bud facing up; in order to achieve efficient coordination of navigation and sowing, a cylinder clutch mechanism was designed. Based on real-time posture feedback, the start and stop of the insertion device and the lifting and lowering of the compaction wheel were controlled to ensure timely interruption and resumption of sowing operations when turning. In order to verify the performance of the prototype, field tests were carried out. The results showed that when the seeder walked in a straight line for 50 m at a typical sowing speed of 0.1 m/s, the maximum and

收稿日期: 2025-06-07 修回日期: 2025-07-22
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD200120402)、山东省自然科学基金面上项目(ZR2022MC139)和山东省蔬菜产业技术体系岗位专家项目(SDAIT-05-11)
作者简介: 李天华(1976—),男,教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail: lth5460@163.com
通信作者: 施国英(1980—),女,正高级实验师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: sgy509@163.com

minimum values of the navigation absolute offset were 32.1 mm and 0.44 mm, respectively, and the average was 11.8 mm; the maximum and minimum absolute deviations of the turning operation path were 40.5 mm and 13.5 mm, respectively, and the average absolute deviation was 25.4 mm; the average positive bud rate, missed sowing rate and reseedling rate were 95.7%, 1.7% and 2.2%, respectively, which met the technical requirements for large-scale field planting.

Key words: garlic; seeder; unmanned; Beidou navigation

0 引言

大蒜作为我国重要的经济作物,截至 2025 年种植面积约为 $7.33 \times 10^5 \text{ hm}^2$,年产量占全球总量的 70% 以上^[1]。然而,人工播种劳动强度大、作业效率低、播种精度差,手扶与驾乘式播种机作业受操作人员精力影响,易走斜、走弯,增加后续机械化收获难度,难以适应大规模、高效、精准的农业生产需求^[2-3]。因此,亟需研发具备高效作业能力、高播种一致性及自主导航功能的无人化大蒜播种装备,以满足当前大蒜产业智能化、规模化发展的迫切需求。

近年来,大蒜播种关键技术研究取得阶段性进展。李骅等^[4]利用 DEM-MBD 耦合仿真技术优化链勺式排种器,显著提升取种单粒率并降低漏充率与重充率。侯加林等^[5]通过离散元技术建立了双鸭嘴式大蒜正头机构的动力学模型,分析了蒜种在不同正头机构中的运动规律,采用优化后的双鸭嘴式正头装置,使蒜种正头率提高至 90% 以上。李天华等^[6-7]以行星轮式大蒜插播机为研究对象,对插播鸭嘴的运动轨迹进行了分析,明确了影响蒜种直立度的关键因素,通过确定最优工作参数,使蒜种直立度较优化前提高了 21.8%。上述研究尽管在单一功能模块方面取得一定进展,但多聚焦于取种或正头环节,缺乏整机系统集成与多机构协同控制,无法满足全程无人化作业要求。

随着卫星导航技术的发展,自动驾驶技术已广泛应用于大田作物生产^[8-12]。杨然兵等^[13]针对履带式马铃薯联合收获机,设计并试验了辅助驾驶作业系统,通过高精度导航与路径跟踪算法,实现了精准作业,显著降低了人工劳动强度并提高了收获效率。张朝宇等^[14]和张闻宇等^[15]提出了一种用于油菜无人播种的调头方法。宋德平等^[16]提出了一种基于北斗导航的智能棉花播种机,显著提高了播种精度和作业效率。陈建林等^[17]和武涛^[18]研究了北斗卫星导航系统在水稻插秧机上的应用,实现了插秧机自动驾驶和直线行走控制。He 等^[19]指出,通过 GPS 系统可以实现玉米播种机在转弯时的播种率补偿,从而提高作物产量。Lee 等^[20]采用纯追踪算法对小麦收获机进行路径跟踪控制,通过调整转

向角度实现精确的路径跟踪。Padhiary 等^[21]指出,将机器学习和人工智能视觉技术集成到全地形车并结合先进导航系统,可显著提高精准作业效率。但目前多数研究侧重于导航精度和路径规划方法,尚缺乏针对作业环节控制与导航系统深度融合的整体设计,在导航与作业信息交互、机具协同控制等方面协议不标准、接口不统一,无法满足企业标准化、批量化生产要求。

针对以上问题,本研究以北斗高精度导航为核心,集成勺链式取种装置、三级调向正头机构及离合插播装置,开发导航、作业一体化控制系统,研制履带式大蒜无人播种机,并通过田间试验验证样机作业性能。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

大蒜无人播种机主要包括驱动底盘、取种装置、正头装置、离合插播装置及控制系统。由汽油发动机提供核心动力,经装有离合轮的变速箱控制播种机的动力传输,通过链传动将动力传递至驱动轴实现取种与插播,控制系统实现导航设置以及直行、转弯、播种启停及压实轮起落等工作状态切换。播种机三维模型如图 1 所示,技术参数如表 1 所示。

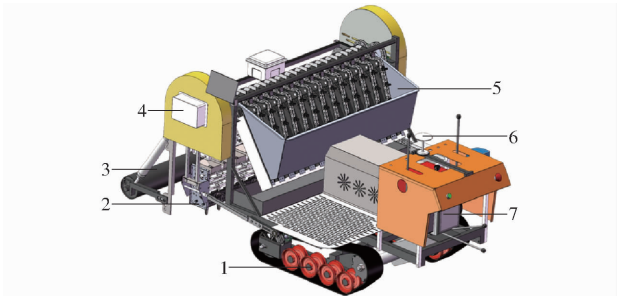


图 1 播种机三维模型

Fig. 1 3D model of seeder

1. 行进底盘装置 2. 插播装置 3. 压实轮 4. 控制器 5. 取种装置 6. GNSS 接收天线 7. 汽油发动机

1.2 工作原理

播种作业前调整机身与田埂平齐,在车载终端设置作业幅宽、行进速度、转弯半径、作业行数及作业方向。通过对作业首行两端实地采集点 A、B 坐标,生成初始路径,并结合大蒜种植要求衍生全局路

表 1 播种机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of seeder

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	2 100×1 750×1 550
行进速度/(m·s ⁻¹)	0~2
整机质量/kg	950
升降高度/mm	-90~250
履带宽度/mm	250
履带轨距/mm	900

径规划。播种机驶入路径规划起始端点时,取种装置与插播装置开始同步运行,实现直线行驶作业;当播种机行进到直线路径末端时插播离合装置中断动力传输,取种装置与插播装置停止运行,压实轮抬起;随后播种机转弯调头进入下一行,自动调整机身与直线路径对齐,取种装置与插播装置开始运行,压实轮落下;重复以上过程,直至作业完成,工作流程如图 2 所示。

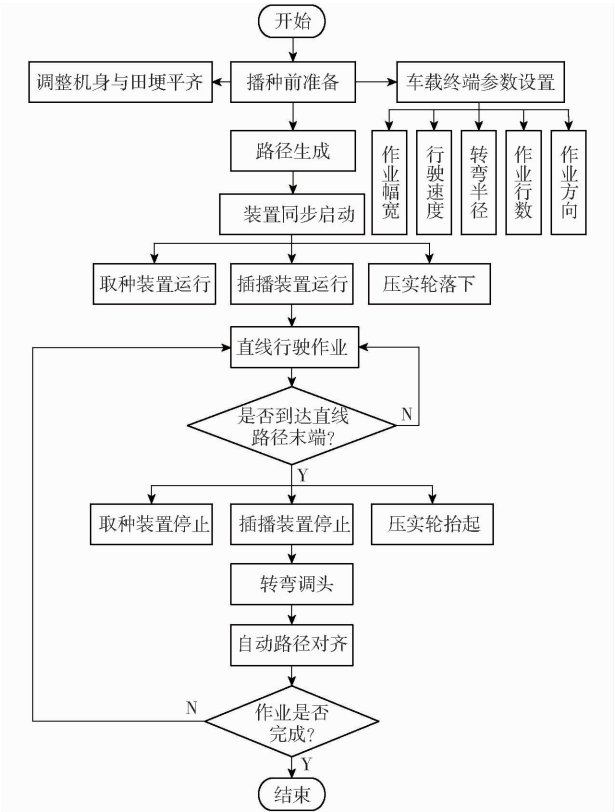


图 2 工作流程图

Fig. 2 Work flowchart

2 播种机关键机构设计

2.1 取种装置

取种装置采用勺链式结构,如图 3 所示,由取种链条、导种盒、护种板、导种管、可拆卸取种勺组件及驱动系统构成。具体工作过程为:取种勺组件从储种仓取 1~2 粒蒜种,并随链条向上做倾斜运动;至种箱最上端时转为水平移动,同时通过链条反转将

蒜种由大勺送入小勺剔除多余蒜种,达到单粒投种效果^[22]。

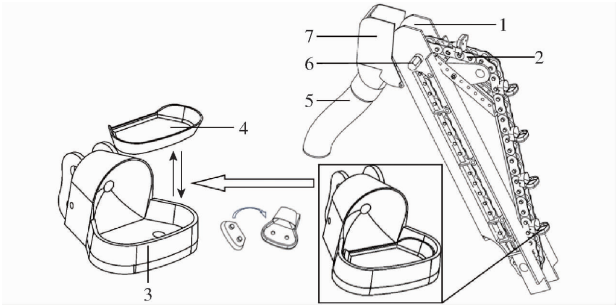


图 3 取种装置结构示意图

Fig. 3 Schematic of seed collection device

1. 护种板 2. 取种链条 3. 主取种勺 4. 卡勺 5. 导种管
6. 传动轴 7. 导种盒

2.1.1 蒜种几何参数

本研究以苍山大蒜为研究对象,通过数显游标卡尺(精度 0.01 mm)测定 300 粒样本三轴尺寸,取各等级蒜体长度、宽度及厚度的均值作为特征尺寸(表 2)。

表 2 蒜种尺寸均值

Tab. 2 Mean values of garlic seed size mm			
等级	长度 L_g	宽度 W_g	厚度 T_g
I	34.0	28.5	20.0
II	30.5	16.0	15.0
III	25.0	13.0	10.0

2.1.2 取种勺设计

为实现取种装置对不同等级(I、II、III级)蒜种的适配,基于蒜种物理特性差异,结合机械容积控制原理,提出主取种勺与卡勺的协同设计方法(图 4)。卡勺由底部双凸型定位柱与主取种勺形成嵌入式连接,通过安装卡勺可调整勺腔有效容积,减小勺腔容积可限制 II、III 级小粒径蒜种的舀取量,从而降低重取率。

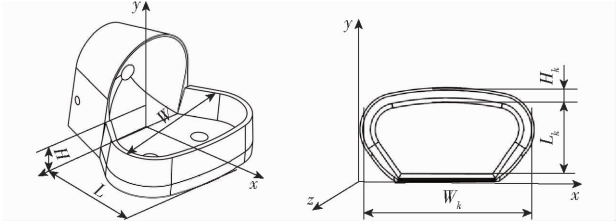


图 4 取种勺结构图

Fig. 4 Structure diagram of seed extraction spoon

以取种时蒜种横躺于取种勺状态为主要尺寸设计依据。主取种勺宽 W 应不大于 I 级蒜种宽度 W_g 的 1.5 倍并不小于蒜种长度 L_g ;主取种勺长 L 应不小于蒜种宽度 W_g ,不大于蒜种厚度 T_g 的 2 倍;为确保单粒蒜种重心在勺腔内并顺利投放,主取种勺深 H 应介于 I 级蒜种厚度 T_g 的 0.5~0.8 倍之间。综

上,主取种勺结构尺寸应满足

$$\begin{cases} L_g \leq W \leq 1.5 W_g \\ W_g \leq L \leq 2 T_g \\ 0.5 T_g \leq H \leq 0.8 T_g \end{cases} \quad (1)$$

经计算,主取种勺以及适应Ⅱ、Ⅲ级蒜种需求的卡勺结构参数如表 3 所示。

表 3 取种勺结构参数

Tab. 3 Seed scoop structural parameters mm			
类型	长度	宽度	深度
主取种勺	38.40	34.00	13.00
Ⅱ级卡勺	27.25	23.00	9.75
Ⅲ级卡勺	22.25	16.50	6.50

2.2 正头装置

蒜种正头装置如图 5 所示,包括支撑架、传动齿轮、气动控制单元及三级异形料斗。由导种管落下的无序蒜种进入第 1 级料斗后,在底部相对平滑的曲面作用下将蒜种统一调整为平铺状态,解决部分蒜种落下时鳞芽朝下的问题;第 2 级料斗利用曲度增大的光滑曲面将接近水平状态落下的蒜种进一步调整为鳞芽以一定角度斜向上直立,以避免锥形底部卡住水平蒜种的情况;经过第 2 级修正后的蒜种以半直立状态进入锥形第 3 级料斗,经料斗修正后以直立状态进入插播鸭嘴。料斗在传动齿轮与气缸联合控制下实现统一开闭^[23]。

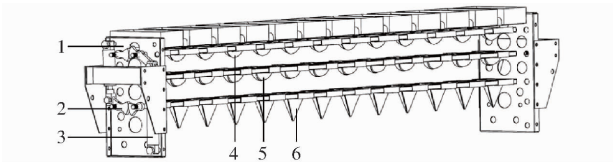


图 5 正头装置结构图

Fig. 5 Structural diagram of positive positioning device

1. 支撑架 2. 传动齿轮 3. 控制气缸 4. 第 1 级料斗 5. 第 2 级料斗 6. 第 3 级料斗

针对原锥形料斗^[23]在定向过程中存在的蒜种姿态调整不充分、易卡种等问题,本设计提出 3 级异形曲面料斗结构(图 6)。将原 45°尖锥结构的第 1 级料斗优化为曲率半径 $R_1 = 85\text{ mm}$ 的圆弧曲面。 R_1 的计算式为

$$R_1 \geq \frac{L_{ga}}{2\sin\theta_1} \quad (2)$$

$$\tan\theta_1 = \mu_1 \quad (3)$$

式中 R_1 ——第 1 级料斗曲率半径,mm
 μ_1 ——蒜种与料斗间摩擦因数,取 0.214
 L_{ga} ——蒜种平均长度,取 32.5 mm
 θ_1 ——圆心角,(°)

通过增大接触面积降低碰撞能量,实现蒜种从

无序到水平平铺的稳定过渡。将第 2 级料斗原 40°尖锥替换为曲率半径 $R_2 = 25\text{ mm}$ 的陡曲率曲面。其曲率半径 R_2 计算式为

$$\sin\beta = \frac{h}{R_2} \quad (4)$$

式中 β ——蒜种目标倾斜角,取 30°
 h ——蒜种质心至圆弧底部高度,取 10 mm^[24]
使蒜种倾斜至目标角度 $\beta \geq 30^\circ$ 。

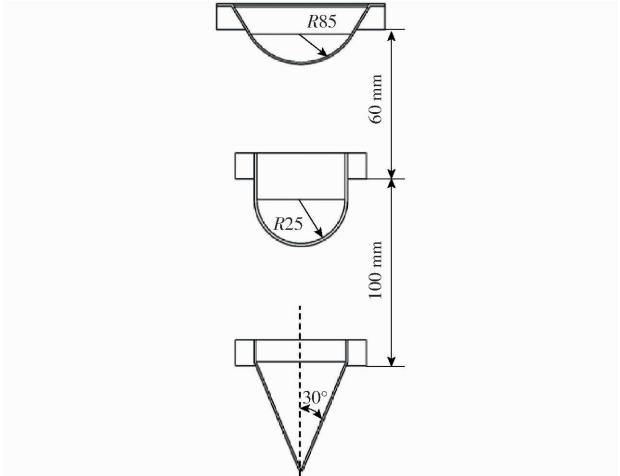


图 6 三级异形曲面料斗结构示意图

Fig. 6 Schematic of three-grade special-shaped curved fabric hopper structure

依据上述方案,第 1 级、第 2 级料斗的曲率半径分别确定为 85 mm 和 25 mm;同时,参照文献[23]中对锥形料斗的研究,将三级料斗的半顶角设计为 30°。经过三级调向机构的协同作用,蒜种最终达到直立状态。

2.3 插播离合装置

在播种机转弯调头时,应停止取种、插播作业,同时压实轮应抬起避免形成壅土。为此,设计插播离合装置,如图 7 所示,包括链传动系统、接近开关组、机架、气缸及离合轮等。当转弯调头时,电磁阀驱动气缸使离合轮脱离取种、播种动力传递轴,停止播种作业;当调头完成恢复播种作业时,控制气缸反向动作,离合轮重新啮合。

气缸作为动力切换的执行元件,其推力需满足离合轮分离与啮合时的力学需求。离合轮分离力 F_d 由链传动系统的预紧力与惯性力共同作用,即

$$F_d = \frac{T\mu}{R} + \frac{I\alpha}{R} \quad (5)$$

式中 μ ——摩擦因数,取 0.15
 T ——传动链预紧力矩,N·m
 R ——离合轮半径,取 100 mm
 I ——转动惯量,取 0.05 kg·m²
 α ——角加速度,取 500 rad/s²
通过拉力传感器实测链传动系统最大阻力确定

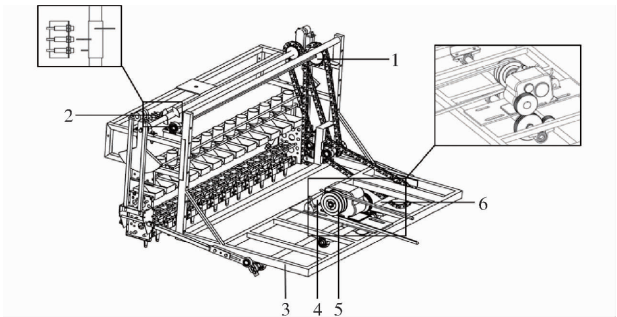


图 7 插播离合装置结构图

Fig. 7 Structure diagram of insertion clutch device

1. 链传动系统 2. 接近开关组 3. 机架 4. 气缸 5. 离合轮
6. 动力传递轴

F_d 为 200 N, 并依据《机械设计手册》中链传动预紧力推荐值换算得 $T = 120 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。则气缸推力 F_c 需满足

$$F_c \geq \frac{F_d}{\eta} \quad (6)$$

式中 η ——机械效率

考虑到气缸活塞与缸体摩擦损耗及传动间隙, 取 $\eta = 0.85$, 代入式 (6) 得气缸推力需满足 $F_c \geq 235.3 \text{ N}$ 。选用 QGBX-M-OO-25-100 型双作用气缸 (活塞直径 $d = 25 \text{ mm}$, 行程 100 mm), 气源压力 p 设定为 0.6 MPa 时理论推力为

$$F_c = \frac{p\pi d^2}{4} \quad (7)$$

代入参数得到理论推力 $F_c = 294.5 \text{ N}$, 满足设计要求, 并保留 25% 安全余量。

3 无人化控制系统设计

3.1 硬件系统组成

系统硬件结构框图如图 8 所示, 主要由插播、行走、导航和传感检测模块组成。传感模块包括北斗高精度定位系统 BT-982K1 双天线北斗 RTK 移动站 (与 BT-980C 基站配套使用) 和 FR12-4DPNP 电感式接近开关, 高精度北斗 RTK 利用差分技术, 实时接收并解算载波相位信息, 实现动态厘米级定位, 接近开关用于反馈插播机构的升降状态; 控制模块由工控一体机 (Windows 10 i5-4200M 型) 和底层控制器组成, 工控机进行导航参数设置、路径规划, 底层控制器对插播与行走模块进行控制; 行走模块由气缸和履带行走机构组成, 通过气缸控制履带差速实现转弯调头; 插播模块通过电磁阀控制气缸同步驱动离合轮与压实轮, 实现插播机具工作时压实轮落下、停止时压实轮升起的联动。升降动作由接近开关实时检测位置, 并通过继电器切断电磁阀电源以保证定位精度。转弯调头时, 该联动机制自动触发插播机构升离地面。

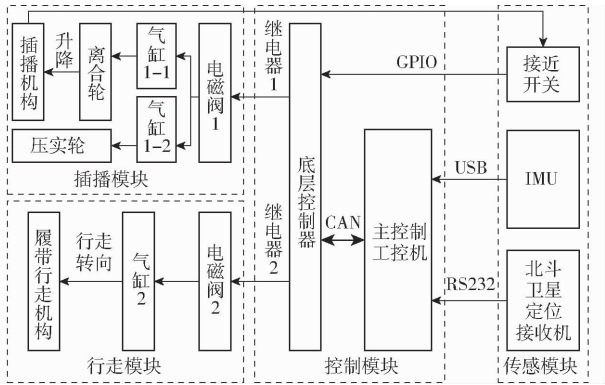


图 8 硬件系统组成示意图

Fig. 8 Schematic of hardware system composition

3.2 控制流程

系统启动后, 首先需将播种机停正并完成作业参数初始化设置, 通过标定初始路径点 A 、 B 坐标生成全局路径规划, 随后将机具复位至预设起点。作业过程中, 播种机以指定挡位执行直线导航, 其 RTK/INS 融合定位模块持续采集实时位置信息, 并与规划路径进行动态比对。当检测到播种机抵达路径标定点时, 系统触发转弯决策机制: 若判断到达换行路径端点, 则通过气缸驱动离合轮切断机具动力, 结合转向机构完成精准调头; 若未达端点, 则维持当前作业状态直至完成整段直线播种。转弯过程中, 接近开关实时监测插播机具的抬升高度, 确保其在最高点锁定后执行转向动作, 避免部件干涉。转弯结束后, 系统自动恢复离合轮动力连接, 并基于更新后的路径参数进入下一轮直线作业循环。该控制逻辑通过多传感器协同检测与执行机构联锁控制, 实现了播种作业中直线精度保持与转弯效率优化的双重目标。控制流程如图 9 所示。

4 样机试验

4.1 导航性能试验

大蒜无人播种机在运行过程中, 直线作业与转弯调头后对正是规范种植的关键。因此对导航性能进行试验, 确保其满足设计要求。试验在济南华庆农业机械科技有限公司试验田进行, 试验样机如图 10 所示。

4.1.1 直线行走试验

本研究在标准化试验田开展直线路径跟踪试验, 如图 11 所示。参照文献 [23] 将播种机基准作业速度设定为 0.1 m/s , 采用全站仪标定 50 m 基准直线路径并获取端点 A 、 B 的精准坐标数据。试验过程中, 通过位姿调整使车体中心基准点与路径起点 A 重合后启动自主导航系统, 基于实时位姿坐标与预设路径的闭环反馈实现行进姿态的动态修正,

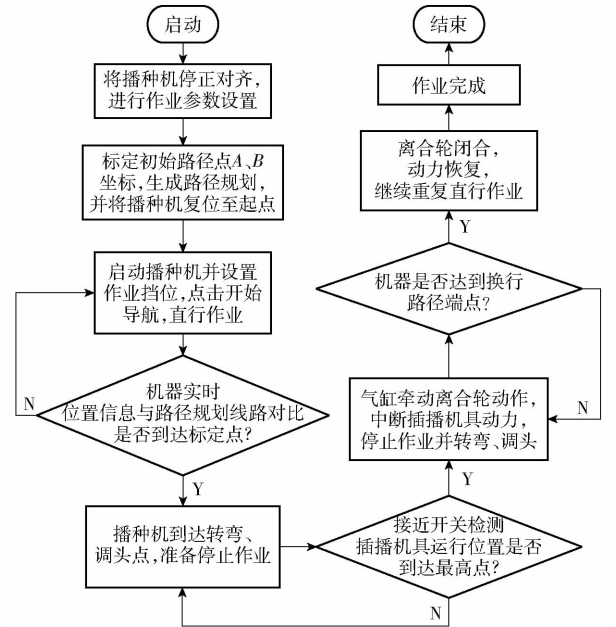


图 9 控制流程图
Fig. 9 Control flowchart



图 10 试验样机
Fig. 10 Prototype test

直至到达终点 B 时终止作业。为验证系统可靠性, 共开展 5 组重复试验, 通过数据采集系统完整记录行进过程中的位姿偏差数据并进行均值处理, 最终试验结果如图 12 所示。



图 11 直线行走试验
Fig. 11 Straight-line walking test

由图 12 可知, 播种机直线行驶时横向偏移量最大值、最小值分别为 32.1、0.44 mm, 平均值为 11.8 mm。考虑到行驶过程中车身抖动等因素, 其偏移量属于合理范围, 满足大蒜规范种植要求。

4.1.2 转弯调头后对正试验

为评估播种机在转弯调头后的路径稳定性、恢复精度以及是否能够准确回到预定的工作轨迹, 设计了转弯调头后的路径恢复对正试验, 转弯调头偏差示意图如图 13 所示, 黑色实线为生成路径线, 红

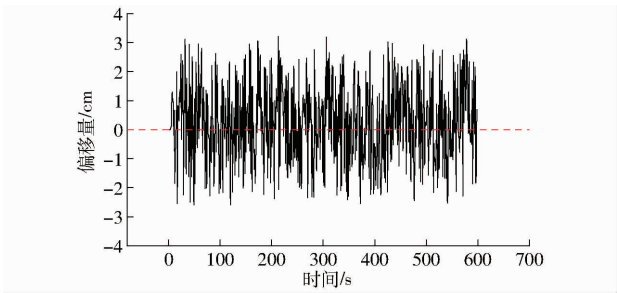


图 12 直线行走试验结果
Fig. 12 Results of straight-line walking test

色虚线为播种机转弯调头偏差路径线, 其中 a 、 b 为偏差量, c 、 d 为播种机恢复对正所行驶距离。试验时, 通过激光水平仪标定履带转弯痕迹, 确保试验过程中播种机的路径能够与预设的参考线进行比较。针对每次转弯调头操作, 随机选定转弯调头后 30 处测量偏差量。对 5 次重复试验的数据进行统计分析, 并绘制偏差量的箱线图以展示其统计分布特征, 如图 14 所示。此外, 记录播种机每次转弯调头所用时间及恢复对正行驶距离, 得到如表 4 所示试验结果。

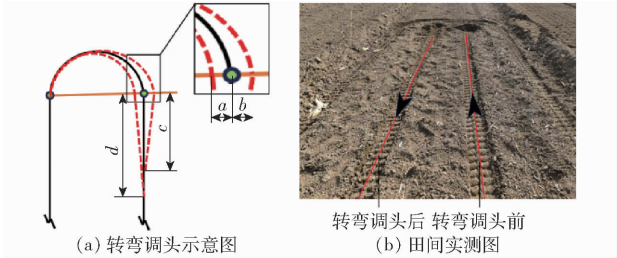


图 13 转弯调头试验
Fig. 13 Turning and U-turn test

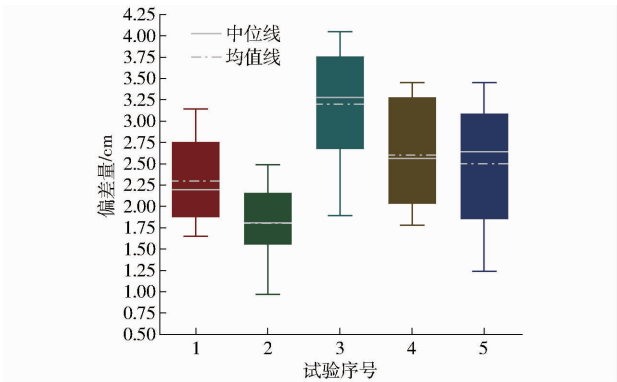


图 14 转弯调头路径偏差分布图
Fig. 14 Deviation distribution of turning paths

表 4 转弯调头后对正试验结果
Tab. 4 Alignment test results after U-turn

编号	平均偏差量/ cm	标准差/ cm	行驶距离/ cm	用时/s
1	2.3	0.485	210	8
2	1.8	0.449	190	6
3	3.2	0.633	280	10
4	2.6	0.591	260	9
5	2.6	0.654	190	7

由图 14 可见,5 组试验的偏差量均保持在 1.5 ~ 4.0 cm 之间,且各组数据分布较为集中。各组中位数(灰色实线)与均值(灰色虚线)相近,说明偏差数据近似对称分布且无明显系统性误差;各试验的四分位距(IQR)平均值约 9.8 mm,揭示 75% 数据点集中在 18.5 ~ 28.3 mm 区间,离散性受控;箱线图上下须覆盖最小偏差 13.5 mm 至最大偏差 40.5 mm,极少数离群点反映特殊工况的瞬时偏移,但未显著影响作业。结合表 4 数据,机器复位行驶距离和所用时间平均值为 226 cm 和 8 s,符合效率需求,满足大蒜规模化种植的行间一致性要求。

4.2 播种效果试验

为评估播种效果,以苍山I级蒜种为研究对象,选取平整、土壤质地均一的砂壤地块作为试验场地。播种前测定 0 ~ 20 cm 土层关键参数,土壤含水率为 (18.2 ± 0.5) % (田间持水量 70% ~ 75% 区间),土壤硬度为 (1.05 ± 0.15) MPa,pH 值为 6.3 ± 0.2,确保符合大蒜播种环境基准^[25]。设定播种深度为 5 cm,穴距为 10 cm,作业速度为 0.1 m/s^[23],采用全站仪和 RTK 定位系统标定路径,以直立度、正芽率、漏播率和重播率为主要评价指标。试验地块划分为 50 m 的作业路径,并将每段路径分为 5 个等长区段,每段随机抽样 100 个播种穴位作为测量样本。直立度通过测量蒜种与水平地面夹角获得;正芽率通过观察蒜种播种方向统计并计算;漏播率通过统计未投放种子的穴位比例计算;重播率则记录单穴多粒蒜种投放的情况。试验样本采集如图 15 所示。

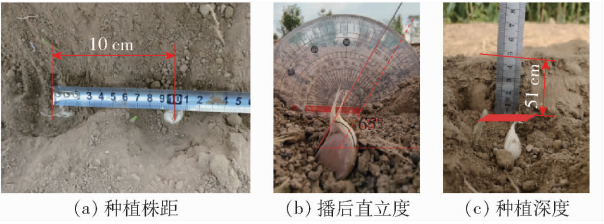


图 15 试验样本采集

Fig. 15 Test sample collection

对试验数据整理并使用 Excel 和 Origin 对数据进行处理和可视化分析,得到大蒜播后直立度分布图,如图 16 所示,播种试验结果见表 5。

由图 16 可知,5 组试验中播后直立度总体分布集中在 60° ~ 85° 之间,且各组数据具有较好的一致性。图中所示中位数(灰色实线)与均值(灰色虚线)大致位于 72° ~ 75° 之间;四分位距较小,说明大多数蒜种都能达到较为均匀的直立度。各组极值范围(上下须)分别延伸至 40° ~ 90°,极端偏低或偏高样本比例极少,表明装置在绝大多数情况下都能实现稳定的直立播种。5 次重复试验间直立度分布曲

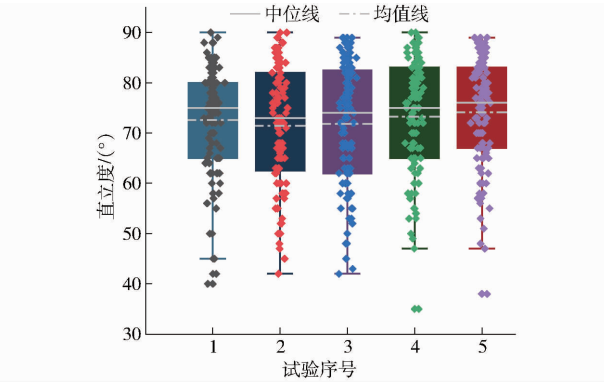


图 16 播后直立度分布图

Fig. 16 Distribution of uprightness after sowing

线高度重合,表明系统的重复性和可靠性较高。

表 5 播种试验结果			
Tab. 5 Seeding test results			%
试验区段	正芽率	漏播率	重播率
1	96.2	1.5	2.0
2	95.7	1.9	2.3
3	95.2	1.8	2.5
4	95.9	1.6	2.2
5	95.5	1.7	2.0
平均值	95.7	1.7	2.2

试验结果表明,大蒜无人播种机在不同试验区段均表现出较高的正芽率,平均值达 95.7%,表明设备能够较好地实现蒜种的直立播种,有利于保证后期出苗整齐度和生长质量;漏播率、重播率均值分别为 1.7%、2.2%,表明该播种机在播种一致性和稳定性方面表现良好,能够满足精准农业的作业要求。考虑到可能受地表平整度、土壤硬度等因素影响,不同试验区段之间的正芽率、漏播率和重播率略有波动,但整体数据变化幅度较小,反映出设备具有较好的适应性和可靠性。

5 结论

(1) 围绕大蒜播种中取种精度低、直立度差及无人化作业协同性不足等核心问题,通过机构创新与导航控制融合,研制了一种基于北斗导航的履带式大蒜无人播种机。并通过系统性田间试验进行验证。

(2) 勺链式取种装置结合可拆卸组合勺结构,单粒取种率均值达 96.1%,漏播率与重播率分别降至 1.7% 和 2.2%。

(3) 三级调向正头装置通过分阶段姿态修正,实现蒜种鳞芽朝上精准播种,正芽率达 95.7%,解决直立度不足难题。

(4) 基于北斗 RTK/INS 的厘米级导航,直线偏移均值 11.8 mm,转弯路径恢复偏差小于等于 5 cm,保障规模化连续作业。

参 考 文 献

- [1] 陈晓鑫, 王孟伟, 白丽, 等. 中国大蒜出口增长的驱动因素研究[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(10): 153 – 160.
Chen Xiaoxin, Wang Mengwei, Bai Li, et al. Research on driving factors of Chinese garlic export growth[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023, 36(10): 153 – 160. (in Chinese)
- [2] 崔志超, 刘先才, 陈永生, 等. 我国大蒜全程机械化生产现状、问题与对策[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(6): 239 – 243, 250.
Cui Zhichao, Liu Xiancai, Chen Yongsheng, et al. Status, problems and countermeasures of whole mechanized production of garlic in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(6): 239 – 243, 250. (in Chinese)
- [3] 魏宏玲, 王小瑜, 陈进熹, 等. 中国大蒜机械化生产现状与发展思路探讨[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(4): 175 – 182.
Wei Hongling, Wang Xiaoyu, Chen Jinxi, et al. Discussion on the present situation and development of mechanized garlic production in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(4): 175 – 182. (in Chinese)
- [4] 李骅, 高吉枫, 王永健, 等. 基于 DEM – MBD 耦合的链勺式大蒜精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 147 – 159.
Li Hua, Gao Jifeng, Wang Yongjian, et al. Design and test of chain-spoon type precision seed-metering device for garlic based on DEM – MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 147 – 159. (in Chinese)
- [5] 侯加林, 黄圣海, 牛子孺, 等. 双鸭嘴式大蒜正头装置调头机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 87 – 96.
Hou Jialin, Huang Shenghai, Niu Ziru, et al. Mechanism analysis and test of adjusting garlies upwards using two duckbill devices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 87 – 96. (in Chinese)
- [6] 李天华, 张海阔, 韩相龙, 等. 勺链式大蒜播种机漏取种检测与补种装置设计及试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 24 – 32.
Li Tianhua, Zhang Haikuo, Han Xianglong, et al. Design and experiment of missing seed detection and the reseeding device for spoon chain garlic seeders[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(4): 24 – 32. (in Chinese)
- [7] 李天华, 黄圣海, 牛子孺, 等. 行星轮式大蒜插播机播种直立度优化与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 37 – 45.
Li Tianhua, Huang Shenghai, Niu Ziru, et al. Optimization and experiment of planting perpendicularity of planetary wheel garlic planter[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(3): 37 – 45. (in Chinese)
- [8] 温昌凯, 谢斌, 李若晨, 等. 拖拉机作业载荷数据平台设计与旋耕作业质量预测[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 372 – 381.
Wen Changkai, Xie Bin, Li Ruochen, et al. Construction of tractor working load data platform and prediction of rotary tillage quality[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 372 – 381. (in Chinese)
- [9] 周俊, 何永强. 农业机械导航路径规划研究进展[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 1 – 14.
Zhou Jun, He Yongqiang. Research progress on navigation path planning of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 1 – 14. (in Chinese)
- [10] 王宁, 韩雨晓, 王雅萱, 等. 农业机器人全覆盖作业规划研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 1 – 19.
Wang Ning, Han Yuxiao, Wang Yaxuan, et al. Research progress of agricultural robot full coverage operation planning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 1 – 19. (in Chinese)
- [11] Bai Y, Zhang B, Xu N, et al. Vision-based navigation and guidance for agricultural autonomous vehicles and robots: a review [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205: 107584.
- [12] 孟志军, 王昊, 付卫强, 等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 1 – 24.
Meng Zhijun, Wang Hao, Fu Weidong, et al. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 1 – 24. (in Chinese)
- [13] 杨然兵, 吕士亭, 张健, 等. 履带式马铃薯联合收获机辅助驾驶作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 231 – 238, 343.
Yang Ranbing, Lü Shiting, Zhang Jian, et al. Design and test of assisted driving operation system of tracked potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 231 – 238, 343. (in Chinese)
- [14] 张朝宇, 卢邦, 李强, 等. 油菜无人播种作业两退三切鱼尾自动调头方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 66 – 75.
Zhang Chaoyu, Lu Bang, Li Qiang, et al. Unmanned seeding automatic control method of rapeseed based on two-back and three-cut fishtail U-turn model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 66 – 75. (in Chinese)
- [15] 张闻宇, 丁幼春, 李兆东, 等. 基于双切圆寻线模型的农机导航控制方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 1 – 10.
Zhang Wenyu, Ding Youchun, Li Zhaodong, et al. Dual circle tangential line-tracking model based tractor navigation control method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 1 – 10. (in Chinese)
- [16] 宋德平, 王成, 孙冬霞, 等. 基于北斗导航的智能棉花播种机设计与试验[J]. 智能化农业装备学报, 2021, 2(1): 44 – 50, 63.

Song Deping, Wang Cheng, Sun Dongxia, et al. Design and test of intelligent cotton planter based on Beidou navigation[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2021, 2(1): 44 – 50, 63. (in Chinese)

[17] 陈建林, 薄克明, 王健平, 等. 水稻插秧机搭载北斗卫星导航系统驾驶作业适配性试验[J]. 农机科技推广, 2022(4): 44 – 45.

Chen Jianlin, Bo Keming, Wang Jianping, et al. Adaptability test of driving operation of rice transplanter equipped with Beidou satellite navigation system[J]. Agriculture Machinery Technology Extension, 2022(4): 44 – 45. (in Chinese)

[18] 武涛. 无人驾驶水稻直播机抗干扰精准跟踪及高效协同作业研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2022.

Wu Tao. Research on anti-disturbance precise tracking and efficient cooperative operation of unmanned rice seeding machine [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2022. (in Chinese)

[19] He X, Zhang D, Yang L, et al. Design and experiment of a GPS-based turn compensation system for improving the seeding uniformity of maize planter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106250.

[20] Lee K, Choi H, Kim J. Development of path generation and algorithm for autonomous combine harvester using dual GPS antenna[J]. Sensors, 2023, 23(10): 4944.

[21] Padhiary M, Saha D, Kumar R, et al. Enhancing precision agriculture: a comprehensive review of machine learning and AI vision applications in all-terrain vehicle for farm automation[J]. Smart Agricultural Technology, 2024, 8: 100483.

[22] 崔荣江, 荐世春, 杨继鲁, 等. 勺链式大蒜取种器的优化设计与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(2): 99 – 102, 107.

Cui Rongjiang, Jian Shichun, Yang Jilu, et al. Optimization design and test of take garlic spoon[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2): 99 – 102, 107. (in Chinese)

[23] 耿爱军, 栗晓宇, 侯加林, 等. 自动定向大蒜播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 17 – 25.

Geng Aijun, Li Xiaoyu, Hou Jialin, et al. Design and experiment of automatic directing garlic planter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 17 – 25. (in Chinese)

[24] 查玲玲. 大蒜直立种植装置设计与研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.

Zha Lingling. Design and research of a vertical planting device for garlic[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023. (in Chinese)

[25] GB/T 36197—2018 土壤质量土壤采样技术指南[S].

(上接第 62 页)

[18] Poger S, Thor I F, Petar V K. Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory[J]. Automatica, 2005, 41(2): 289 – 298.

[19] Zhang G Q, Liu S, Zhang X K, et al. Event-triggered cooperative formation control for autonomous surface vehicles under the maritime search operation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(11): 21392 – 21404.

[20] Wei Q L, Song R Z, Yan P F. Data-driven zero-sum neuro-optimal control for a class of continuous-time unknown nonlinear systems with disturbance using ADP[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(2): 444 – 458.

[21] Lu C X, Meng D Y, Li H Y. Data-induced learning control for unknown nonlinear systems with full-tracking performances[J]. Science China Information Sciences, 2025, 68(8): 1 – 14.

[22] Yang X, He H B. Adaptive critic designs for event-triggered robust control of nonlinear systems with unknown dynamics[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 49(6): 2255 – 2267.

[23] Fu Y, Chai T Y. Online solution of two-player zero-sum games for continuous-time nonlinear systems with completely unknown dynamics[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(12): 2577 – 2587.

[24] Durstewitz D, Koppe G, Thurm M I. Reconstructing computational system dynamics from neural data with recurrent neural networks[J]. Nature Reviews Neuroscience, 2023, 24(11): 693 – 710.

[25] Zhang G Q, Cai Y Z, Zhang W D. Robust neural control for dynamic positioning ships with the optimum-seeking guidance [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(7): 1500 – 1509.