

制种玉米去雄无人机旋切装置设计与试验

陈立平^{1,2} 欧 鸿^{1,2} 张瑞瑞² 丁晨琛² 伊铜川² 海锦辉²

(1. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004; 2. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 针对制种玉米母本植株由地面去雄机械去雄后存在遗漏雄穗及机械化补漏去雄装备缺乏等问题, 提出了一种适配四旋翼无人机的旋切装置。基于去雄无人机作业特点与稳定性影响因素, 分析了刀具切割雄穗时的受力及其对无人机反扭力矩的影响, 并轻量化设计了旋切装置总体结构, 确定了旋切装置的旋切范围为44~150 mm, 开展范围为541~1 318 mm, 总质量为4.03 kg。通过旋切部件切割建模与仿真, 选取了竖直进给切割的旋切方式, 并由台架试验得到了旋切装置切割反扭力矩最小时的最优参数组合。在上述基础上将旋切装置与无人机集成开展田间试验。研究表明, 当旋切转速3 954 r/min、竖直进给速度5.9 mm/s、刀具刀角32°时, 旋切装置单位切割力为10.54 MPa, 能完全切除雄穗, 去雄无人机田间叶片损伤率为14.58%, 高度波动率为1.88%, 满足制种玉米去雄要求。

关键词: 制种玉米; 去雄; 无人机; 进给切割; 旋切装置

中图分类号: S224.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)04-0053-11

OSID:



Design and Experiment of Rotary-cutting Device for Corn Seed Production Detasseling UAV

CHEN Liping^{1,2} OU Hong^{1,2} ZHANG Ruirui² DING Chenchen² YI Tongchuan² HAI Jinhui²

(1. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China

2. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: A rotary-cutting device suitable for a four-rotor UAV was proposed to address the problems of missing tassels after ground detasseling machine and lacking of mechanized filling and detasseling equipment of female tassel detasseling for corn seed production. Based on the operation characteristics and stability influencing factors of the detasseling UAV, the force of the cutting tool when cutting the tassel and its influence on the anti-torsional torque of the UAV were analyzed, and the overall structure of the rotary-cutting device was designed. The rotary-cutting range of the rotary-cutting device was 44 ~ 150 mm, the folding range was 541 ~ 1 318 mm, and the total mass was 4.03 kg. Through the cutting modeling and simulation of the rotary-cutting part, the rotary-cutting method of the vertical feed cutting was selected, and the optimal parameter combination when the cutting anti-torsion torque of the rotary-cutting device was the smallest was obtained by the bench experiment. On the basis of the above, a field experiment was carried out by integrating the rotary-cutting device with the UAV. The results showed that the unit cutting force was 10.54 MPa when the rotary-cutting speed of the rotary-cutting device was 3 954 r/min, the vertical feed speed was 5.9 mm/s, and the cutting tool edge angle was 32°, and the rotary-cutting device could remove the tassel comprehensively. The damage rate of leaves for detasseling UAV in the field was 14.58%, and the fluctuation rate of height was 1.88%, which could meet the requirements of detasseling for corn seed production.

Key words: corn seed production; detasseling; UAV; feed cutting; rotary-cutting device

0 引言

杂交玉米因具有增产显著、适应性强等优势而

被广泛种植^[1]。纯度是评价杂交玉米种子质量的重要指标。玉米制种生产过程中的母本去雄质量决定种子纯度^[2]。随着玉米制种产业发展, 杂交玉米

制种规模逐年增长,如何高效保障去雄质量是当前制种行业面临的重要挑战。

机械化去雄可提高去雄效率,保障去雄质量,制种玉米去雄机械化是推动制种行业高速发展的必然趋势。国内去雄机械发展较晚,但也取得了一系列研究成果。酒泉奥凯种子机械股份有限公司研制了OK104-3CX型自走式玉米抽雄机^[3],有8组去雄部件,整机采用液压传动技术;中国农业机械化科学研究院开发了3XZG-8YA型自走式玉米去雄机^[4],作业过程流畅,去雄效果符合行业标准;陈立平等^[5]发明了一种玉米去雄巡检机器人,通过玉米植株图像和去雄作业点预测模型,提高了去雄成功率。以上去雄机械适用大面积制种田规模化去雄,虽具有良好的去雄效果,但仍存在遗漏率,难以达到100%去雄,制种企业需采取人工或地面去雄机械多次进地补漏去雄。人工巡检补漏去雄作业效率低、作业质量难以保证,地面去雄机械多次进地易损伤玉米植株、造成地地板结,作业成本高。近年来旋翼无人机因具有飞行速度快、地形适应性广、地面作物破坏性小等优点,在农林业中应用越来越广泛^[6-8]。任万军等^[9]基于多旋翼无人机平台设计了一种水稻撒肥系统,提高了无人机撒肥均匀性。高学梅等^[10]基于农用多旋翼无人机平台,设计离心甩盘式绿肥种子撒播装置。以上关于无人机农业应用的研究集中于施药、施肥、病虫害监测等领域,在制种玉米去雄方面的应用较少。

本文基于无人机设计一种轻量化旋切装置,为地面去雄机械作业后的制种玉米100%去雄提供机械化、智能化补漏去雄装备。基于飞行平台,分析刀具切割雄穗时的受力及其对无人机反扭力矩的影响,完成旋切装置总体结构设计,确定旋切部件与可展部件关键结构及参数;利用Motion运动学仿真优化可展部件的工作性能,通过ANSYS Explicit Dynamics切割仿真确定去雄无人机最佳旋切方式;由台架试验确定旋切装置最优作业参数组合,并与无人机集成开展田间试验,验证去雄无人机的作业效果。

1 装置结构与工作原理

1.1 装置总体结构

无人机与地面机械相比,其稳定性受旋切装置质量、旋切转速、展开高度及刀具与雄穗之间相互作用的影响,设计适配无人机的旋切装置时应考虑上述因素。结合制种玉米遗漏雄穗零散分布特点及去雄农艺要求,基于无人机的旋切装置由可展部件、旋切部件、去雄系统等组成,如图1所示。

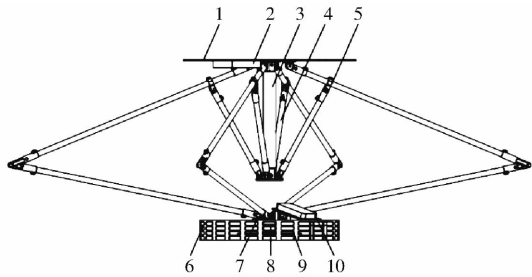


图1 基于无人机的旋切装置结构图
Fig.1 Structural diagram of rotary-cutting device based on UAV

1. 上安装平台 2. 去雄系统 3. 伸缩电机 4. 折叠机构 5. 双菱形连杆机构 6. 去雄刀罩 7. 下安装平台 8. 切割电机 9. 去雄刀具 10. 作业监测模块

可展部件由上安装平台、下安装平台、伸缩电机、折叠机构及双菱形连杆机构构成,通过上安装平台与无人机集成;旋切部件由切割电机、去雄刀具、去雄刀罩及作业监测模块等构成,固定于可展部件下安装平台,对单株玉米旋切去雄。去雄系统可与无人机飞控系统关联,通过无人机地面站软件实现无人机飞行及旋切装置去雄作业控制。

1.2 工作原理

遥感无人机提供玉米平均高度信息与带穗玉米植株位置信息,去雄无人机利用无人机飞控系统设置对地高度并悬停于目标玉米植株上方;去雄系统向旋切装置发送去雄作业指令,控制可展部件伸缩电机行程杆伸长,折叠机构通过转动副与电机底座连接,双菱形连杆机构在折叠机构的支撑下展开,确保去雄刀罩完全笼罩目标雄穗后行程杆停止运动;去雄系统控制切割电机按设定转速带动去雄刀具旋切,转速稳定后行程杆继续运动,旋切部件将目标雄穗从顶部切除,切割过程参数和完成后的切口影像由作业监测模块实时监测,以保障每次去雄的完成度和质量。

2 主要部件设计

2.1 设计要求

基于作业需求和无人机稳定性影响因素分析,旋切装置应满足:①轻量化,旋切装置的质量尽可能小,一方面降低对无人机飞行和作业的干扰,另一方面减少无人机作业过程中的下洗气流强度,从而降低气流导致的雄穗晃动。②去雄过程外部反扭力矩小,旋切装置采取旋切方式去雄,刀具切割雄穗与雄穗抵抗变形相互作用对切割电机施加的反扭力矩与无人机悬停时旋翼平衡的反扭力矩耦合,影响无人机稳定性,设计时应优化刀具设计,减小反扭力矩的影响。③旋切高度自动可调,雄穗位置高度不统一,

差异较大,受遗漏雄穗周围玉米影响,单纯依赖无人机飞行高度调节难以满足要求,需要旋切装置根据雄穗高度自动折展,满足不同高度的玉米雄穗去雄要求。

2.2 作业方式与受力分析

去雄无人机的作业目标是地面机械去雄后零散分布的遗漏雄穗,设计光刃直刀^[11]作为去雄刀具进行无支撑滑切,如图 2 所示。 F_N 为刀具对玉米雄穗的法向作用力; v 为接触瞬间刀具与玉米雄穗接触点的速度; R_q 为玉米雄穗未与刀具接触的其他部位对接触部位产生的阻力,方向与 v 相反; F_f 为刀具对玉米雄穗叶表面的摩擦力; β 为刀具在接触点处的滑切角; C 为刀具宽度。

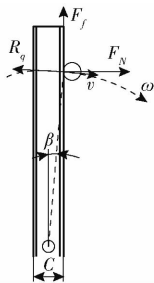


图 2 无支撑滑切受力分析

Fig. 2 Unsupported sliding cutting

无支撑切割须具备较高的速度,静止的玉米雄穗瞬间获得刀具传递的角速度,产生加速度及方向相反的惯性力。在玉米整株高度上各点的加速度和惯性力是不同的,看作惯性力合力 $\sum P_l$ ^[12] 作用在刀刃和雄穗的接触点上,如图 3a 所示。雄穗被切断需满足条件

$$P_d = \sum P_l + P_w \geq R_q \tag{1}$$

式中 P_d ——刀具切割力, N

P_w ——玉米雄穗抗弯力, N

无支撑切割玉米雄穗包含 3 个阶段:刀具的冲击力使雄穗弯曲发生偏移;刀具刃口挤压雄穗轴向表面;刀具切入雄穗,完成雄穗切割。切入雄穗过程中刀具受力如图 3b 所示。

平面内受力关系为

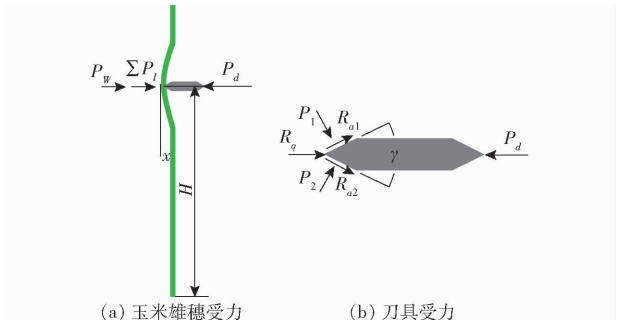


图 3 玉米雄穗切割受力分析

Fig. 3 Force analysis of corn tassel cutting

$$P_d = R_q + (P_1 + P_2) \sin \frac{\gamma}{2} + (P_{a1} + P_{a2}) \cos \frac{\gamma}{2} \tag{2}$$

式中 P_{a1} ——玉米雄穗切除处上端面对刀具上刃面的摩擦力, N

P_{a2} ——玉米雄穗切除处下端面对刀具下刃面的摩擦力, N

P_1 ——玉米雄穗受挤压而对刀具上刃面产生的反作用力, N

P_2 ——玉米雄穗受挤压而对刀具下刃面产生的反作用力, N

γ ——刀具刃角, ($^\circ$)

分析表明雄穗的切割效果受刀具的刃宽、刃角、刃长、刃型及切割时的速度影响。

2.3 无人机作业稳定性

旋切装置与无人机集成时,旋切装置受外部载荷的干扰影响无人机稳定性。刀具旋切玉米雄穗时有

$$P_d \Delta t = m (\omega_b - \omega_a) D_t \tag{3}$$

式中 m ——刀具质量, kg

ω_b ——刀具接触雄穗前角速度, rad/s

ω_a ——刀具接触雄穗后角速度, rad/s

Δt ——接触时间, s

D_t ——刀具与雄穗接触到转动中心的距离, m

切割力矩为

$$M_c = P_d D_t \tag{4}$$

式中 M_c ——切割力矩, N·m

无人机悬停时,旋翼提供的反扭力矩如图 4 所示。满足平衡方程

$$\begin{cases} M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = 0 \\ M_1 = M_3 \\ M_2 = M_4 \end{cases} \tag{5}$$

式中 M_1 ——1 号旋翼提供的反扭力矩, N·m

M_2 ——2 号旋翼提供的反扭力矩, N·m

M_3 ——3 号旋翼提供的反扭力矩, N·m

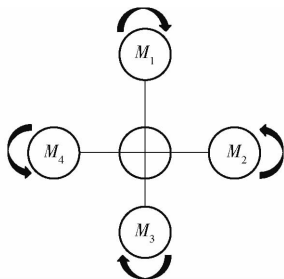


图 4 旋翼提供的反扭力矩示意图

Fig. 4 Schematic of anti-torsional moment provided by rotors

M_4 ——4 号旋翼提供的反扭力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$

根据牛顿第三定律, 去雄刀具与雄穗接触时, 雄穗抵抗变形对切割电机施加反扭力矩为

$$M_t = -M_c = -\frac{m(\omega_b - \omega_a)}{\Delta t} D_t^2 \tag{6}$$

式中 M_t ——雄穗抵抗变形对切割电机施加反扭力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$

切割电机所受反扭力矩与无人机旋翼产生的反扭力矩耦合, 破坏悬停时的反扭力矩平衡, 影响无人机稳定性。理论分析表明: 切割电机所受反扭力矩由旋切转速、去雄刀具质量、刀具与雄穗接触到转动中心的距离及接触时间决定。去雄刀具满足去雄要求时, 质量越小越利于减小附加反扭力矩。雄穗所受切割力满足失效要求时, 旋切转速及刀具与雄穗接触到转动中心的距离越小, 刀具与雄穗接触时间越长, 越利于无人机稳定性。

选择具备悬停稳定性调控能力的无人机可保障无人机稳定性。存在附加反扭力矩时, 飞控系统自主调节旋翼电机转速, 与切割电机所受反扭力矩方向相反的旋翼电机转速增加, 方向相同的转速保持不变或降低, 使旋翼产生的反扭力矩与切割电机所受反扭力矩耦合后实现新的动态平衡。本研究选择适配所设计旋切装置的四旋翼 HY600 型无人机, 性能参数如表 1 所示。

表 1 HY600 型无人机性能参数
Tab. 1 Parameters of HY600

参数	数值
整机质量/kg	16.9
旋翼数/对	4
桨叶数/片	8
桨叶长度/mm	415
旋翼展开直径/mm	890
机臂长度/mm	675
整机展开尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 075×1 075×490
最大载荷/kg	20
空载续航时间/min	28
满载续航时间/min	12

2.4 旋切部件刀具设计

基于无人机稳定性分析, 避免对已去雄玉米植株造成叶片损伤, 刀具的设计应考虑制种玉米的种植规模。旋切部件刀具长度应满足

$$2d_t + d < L < 2S \tag{7}$$

式中 d_t ——玉米雄穗最大直径, mm

d ——刀轴直径, mm

L ——刀具长度, mm

S ——玉米种植株距, mm

我国西北地区玉米制种田采用覆膜宽窄行种

植, 宽行 600 mm, 窄行 450 mm, 株距为 200 mm, 玉米雄穗最大直径 12 mm。各参数代入式(7)得刀具长度为 39~400 mm, 在不对目标玉米雄穗植株周围的植株造成损伤前提下, 结合去雄刀罩尺寸, 刀具旋切范围越大, 切割精准度越高, 设计去雄刀具长 300 mm, 去雄刀具旋切作业如图 5 所示。

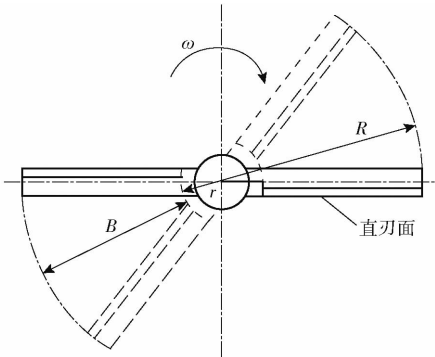


图 5 去雄刀具旋切作业示意图

Fig. 5 Rotary-cutting operation diagram of detasseling cutting tool

刀具刃型是直刃面, 雄穗无支撑切割临界转速测试试验表明: 刀具与雄穗接触到转动中心的距离 d_t 为 0.12 m 时, 旋切临界转速 n_c 约 3 000 r/min, 切割电机施加负载后峰值转速 $n_{\max}$ 约 7 200 r/min。旋切装置旋切范围满足

$$\omega_c = \frac{2\pi n_c}{60} \tag{8}$$

$$v_c = \omega_c D_t \tag{9}$$

$$\omega_{\max} = \frac{2\pi n_{\max}}{60} \tag{10}$$

$$r = \frac{v_c}{\omega_{\max}} - \frac{d_t}{2} \tag{11}$$

$$R = \frac{L}{2} \tag{12}$$

$$r < B < R \tag{13}$$

式中 v_c ——切割线速度临界值, m/s

$\omega_{\max}$ ——角速度峰值, rad/s

r ——最小旋切半径, m

R ——最大旋切半径, m

B ——装置作业旋切半径, m

ω_c ——角速度临界值, rad/s

为减小切割电机所受反扭力矩的影响, 去雄刀具参数如表 2 所示。

2.5 可展部件设计

基于 HY600 型无人机性能参数, 考虑无人机旋翼下洗气流的分布及可展部件完全展开时的无人机稳定性, 设计一种单自由度可展部件^[13-14]。

可展部件折叠时, 菱形连杆间夹角为 60°, 对称分布, 收于无人机腹部, 位于起落架内侧; 折展运动

表 2 刀具参数

Tab.2 Parameters of cutting tool

参数	数值
刀具质量/kg	0.07
刃数	2
最大旋切半径 R/mm	150
最小旋切半径 r/mm	44
刀刃长/mm	106
刀刃厚/mm	2
刀刃宽/mm	6

时,旋切装置重心沿伸缩电机运动方向线性变化,利于保障无人机稳定性;完全展开时,旋切部件工作平面避开下洗气流速度最大处,处于下洗气流稳定位置,且可展部件晃动幅度小。为保证旋切装置质量满足无人机电荷要求,可展部件各连杆采用碳纤维管,转动副及上下安装平台采用铝合金材料,工作参数如表 3 所示。旋切装置质量 4.03 kg,约为所选 HY600 型四旋翼无人机最大载荷的 20%,满足无人机电荷要求。

表 3 可展部件工作参数

Tab.3 Working parameters of deployable part

参数	数值
双菱形连杆机构上杆长度 L_1/mm	740
双菱形连杆机构下杆长度 L_2/mm	770
折展机构上杆长度 L_3/mm	140
折展机构下杆长度 L_4/mm	300
伸缩电机长度 L_5/mm	335 ~ 435
双菱形连杆机构下杆与伸缩电机夹角 $\alpha_1/(\text{^\circ})$	11.73 ~ 68.2
折展机构下杆与伸缩电机夹角 $\beta_1/(\text{^\circ})$	7.3 ~ 29.6
双菱形连杆机构上杆与伸缩电机夹角 $\theta_1/(\text{^\circ})$	14.2 ~ 78.76
旋切装置可展范围/mm	471 ~ 1 539

3 仿真分析

3.1 可展部件运动学仿真与优化

可展部件折展运动的平稳性对无人机稳定性有影响,需仿真分析可展部件工作性能。利用 Solidworks 软件建立可展部件仿真模型,基于 Solidworks Motion 插件开展运动学仿真^[15],完成优化设计,可展部件展开过程如图 6 所示。

伸缩电机驱动力最大值最小化作为优化目标,可展部件折叠线性高度最大值最小化与完全展开线性高度最小值最大化作为约束条件, L_3 为变量,优化仿真结果,确定可展部件最优参数。可展部件优化前后展开过程运动学特性曲线如图 7 所示。

可展部件优化前后运动学特性曲线表明:优化前可展部件运动曲线波动大,无人机悬停稳定性差。优化后运动曲线光滑平缓,不存在冲击与振动,利于保障去雄无人机悬停稳定性。优化后可展部件参数如表 4 所示。

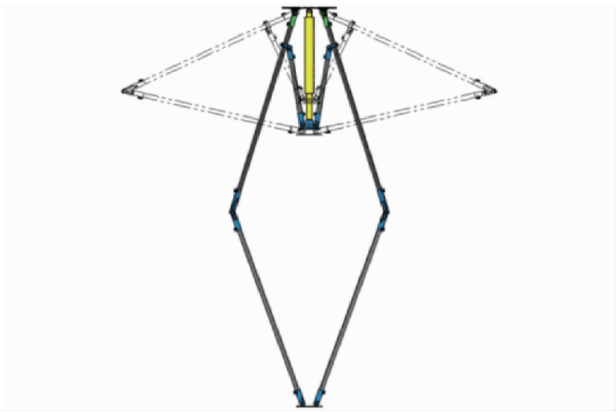


图 6 可展部件展开过程

Fig.6 Deployment process of deployable part

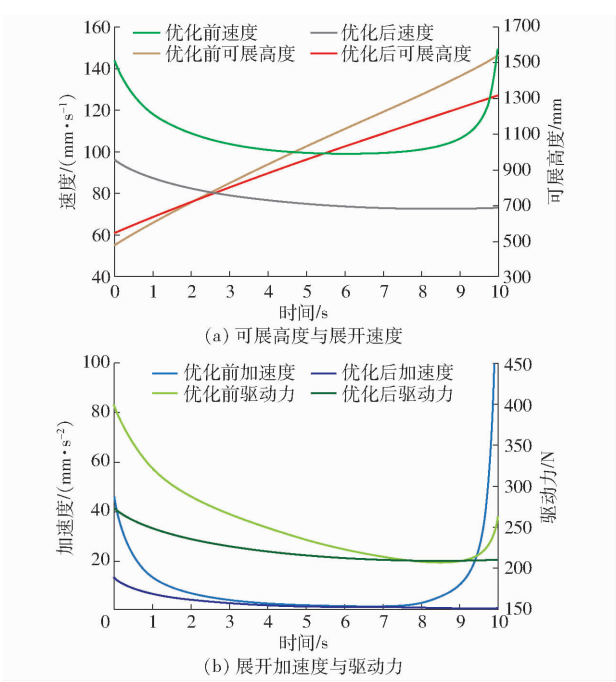


图 7 可展部件优化前后运动学特性曲线

Fig.7 Kinematic characteristic curves of deployable part before and after optimization

表 4 优化后可展部件工作参数

Tab.4 Working parameters of optimized deployable part

参数	数值
双菱形连杆机构上杆长度 L_1/mm	740
双菱形连杆机构下杆长度 L_2/mm	770
折展机构上杆长度 L_3/mm	170
折展机构下杆长度 L_4/mm	300
伸缩电机长度 L_5/mm	335 ~ 435
双菱形连杆机构下杆与伸缩电机夹角 $\alpha_1/(\text{^\circ})$	32.1 ~ 66.2
折展机构下杆与伸缩电机夹角 $\beta_1/(\text{^\circ})$	19.8 ~ 35.5
双菱形连杆机构上杆与伸缩电机夹角 $\theta_1/(\text{^\circ})$	35.4 ~ 75.3
旋切装置可展范围/mm	541 ~ 1 318

3.2 旋切部件切割建模与仿真

3.2.1 仿真参数标定

利用 ANSYS Explicit Dynamics 开展玉米雄穗切割仿真试验^[16]。玉米雄穗属正交各向异性材料,可

简化为各向同性材料^[17]。研究前期通过质构仪、摩擦仪等仪器,采用排水法、斜面法等方法标定玉米雄穗材料参数。刀具材料是 ANSYS 材料库内的 Structural Steel,仿真模型参数如表 5 所示。

表 5 仿真模型参数
Tab. 5 Simulation model parameters

材料	参数	数值
雄穗	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.877
	杨氏模量/MPa	36
	泊松比	0.2
	剪切模量/MPa	14
刀具	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	8.260
	抗弯强度/MPa	340
	泊松比	0.3
	热轧硬度/HRC	48.5

3.2.2 仿真模型建立与参数设置

基于 Solidworks 建立玉米雄穗切割仿真模型,利用 ANSYS Explicit Dynamics 仿真,定义接触目标是刀具与雄穗接触的刃面,被接触目标是雄穗表面,接触时存在摩擦。根据前期摩擦因数测量试验,静摩擦因数与动摩擦因数分别设置为 0.45 与 0.6。采用多区域网格划分法细化雄穗及刀具接触面网格,基于旋切雄穗的方式施加约束,包括对雄穗底部施加固定约束,对刀具施加旋切角加速度或转速,设定仿真时间并开始切割仿真,输出结果数据,观察切割过程。

3.2.3 仿真结果分析

去雄无人机切割雄穗采取无支撑切割,主要方式有 3 种:①一刀切割:确定雄穗高度,刀具以旋切角加速度冲击切断雄穗。②水平进给切割:确定雄穗高度,刀具在同一水平面内以一定速度水平进给旋切雄穗。③竖直进给切割:可展部件控制切割高度,刀具以一定速度从雄穗顶部竖直进给旋切雄穗。图 8 所示为切割仿真结果。

一刀切割时如图 8a 所示,刀具以 $18\,000\text{ rad/s}^2$ 的旋切角加速度冲击雄穗,雄穗表皮被破坏,产生塑性压缩变形并弯曲。雄穗满足失效条件,刃口对雄穗施加切割力,未切断部分受刀具冲击力而上下部分分离,撕裂严重。调整旋切角加速度为 $3\,000\sim 9\,000\text{ rad/s}^2$ 与 $9\,000\sim 15\,000\text{ rad/s}^2$ 时,仿真切割效果分别为刀具的冲击力小于雄穗惯性力而出现反转的情况,以及雄穗出现应力集中现象而出现弯曲破坏的情况。

水平进给切割时如图 8b 所示,刀具以 $2\,500\text{ r/min}$ 的转速旋切雄穗,刀具对雄穗施加切割力,同时雄穗对刀具产生反作用力。刀具刃口从雄穗边缘挤压雄

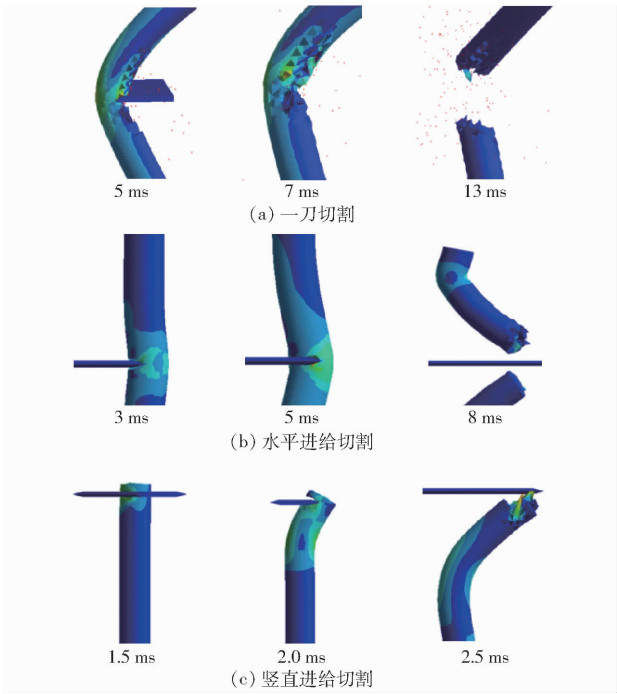


图 8 玉米雄穗切割仿真结果

Fig. 8 Simulation results of corn tassel cutting

穗表面,与刀具接触部分率先满足失效条件,随着刀具进给完成雄穗切割,切割茬口轻微撕裂。调整旋切转速为 $2\,500\sim 3\,000\text{ r/min}$ 、 $2\,000\sim 2\,500\text{ r/min}$ 、 $1\,500\sim 2\,000\text{ r/min}$ 与 $1\,000\sim 1\,500\text{ r/min}$ 时,仿真切割效果分别为完全切除雄穗且切割茬口无撕裂的情况、完全切除雄穗但切割茬口存在轻微撕裂的情况、雄穗出现弯曲破坏的情况,以及刀具因雄穗阻挡而出现停止旋转的情况。

竖直进给切割时如图 8c 所示。刀具从玉米雄穗顶部以 $3\,000\text{ r/min}$ 的转速竖直进给旋切雄穗,并向下挤压雄穗断面。切割过程雄穗弯曲变形小,刀具向下挤压导致切割茬口撕裂,进给至设置切割高度不再挤压时,茬口平整度好。调整旋切转速为 $2\,100\sim 2\,400\text{ r/min}$ 、 $2\,400\sim 2\,700\text{ r/min}$ 与 $2\,700\sim 3\,000\text{ r/min}$ 时,仿真切割效果分别为切割位置以下部位出现弯曲破坏的情况,切割茬口在切割始末存在撕裂的情况,以及切割过程茬口存在撕裂但最终无撕裂的情况。

切割仿真表明:一刀切割的茬口平整度劣于水平进给切割和竖直进给切割,断面撕裂严重,且需要很大的旋切角加速度,对切割电机要求高,不利于旋切装置轻量化设计;水平进给切割的雄穗弯曲变形程度大于竖直进给切割。

基于理论分析,弯曲变形程度决定切割电机所受反扭扭矩,对无人机稳定性有重要影响,竖直进给切割优于水平进给切割。基于遗漏雄穗分布特征与制种玉米去雄农艺要求,水平进给切割相比竖直进

给切割易造成玉米叶片损伤,影响玉米制种产量。综上所述,竖直进给切割是去雄无人机最佳旋切方式。

4 去雄试验

4.1 台架试验

4.1.1 台架试验设计

通过 Design-Expert 软件,采用 Box – Behnken 设计方法^[18],选择单位切割力作为试验指标^[19-20]开展台架试验。理论分析及仿真试验表明,旋切转速、竖直进给速度及刀具刃角是影响旋切装置工作质量的重要因素,影响去雄无人机稳定性。前期单因素仿真结果表明,切割茬口平整度好,切割力小时各因素的取值范围为:旋切转速 3 500 ~ 4 500 r/min、竖直进给速度 5 ~ 7 mm/s、刀具刃角 15° ~ 45°。

综上所述,以旋切转速、竖直进给速度、刀具刃角为试验因素,单位切割力为评价指标设计台架试验,试验因素编码如表 6 所示。

表 6 台架试验因素编码

Tab.6 Factors coding of bench experiment

编码	因素		
	旋切转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	竖直进给速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	刀具刃角/ ($^{\circ}$)
-1	3 500	5	15
0	4 000	6	30
1	4 500	7	45

4.1.2 台架结构及试验过程

试验台架由台架主体、旋切装置、控制箱、转速传感器、电磁功率传感器等组成,如图 9 所示。旋切装置通过安装基座固定于台架主体顶部中间横梁位置,控制箱安装于台架侧面,电磁功率传感器安装于切割电机电源输入端,转速传感器安装于可展部件末端连接件。切割过程由转速传感器记录旋切转速,电磁功率传感器记录电流、电压。通过可展部件伸缩电机行程变化,实现旋切装置折展,控制旋切部件竖直进给,调节旋切高度。伸缩电机外接电机调速器,由控制箱控制速度,实现竖直进给速度可调。

试验利用五点取样法^[21],每点取样 9 株,获得玉米植株平均株高 1 900 mm,雄穗根部距顶部平均高度 450 mm,雄穗最大切断面平均面积 95 mm²。烘干法测得雄穗平均含水率 89.3%,前期玉米雄穗剪切试验测得剪切强度 0.76 MPa,试验台架如图 10 所示。

三相汽油发电机供电经 24 V 直流稳压电源调节后通过电源适配电路接入控制箱,控制箱调节伸

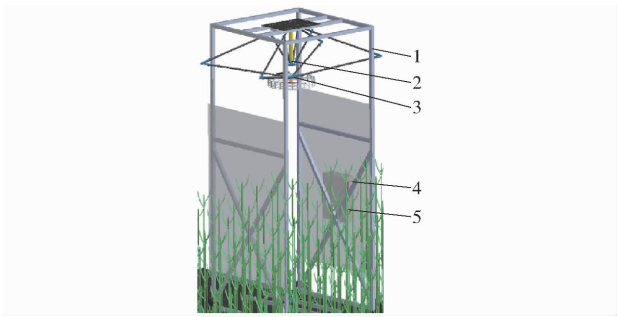


图 9 试验台架结构图

Fig.9 Structure diagram of experiment bench

1. 台架主体 2. 旋切装置 3. 转速传感器 4. 电磁功率传感器
5. 控制箱



图 10 试验台架

Fig.10 Experiment bench

缩电机与切割电机工作参数的同时提供工作电源。记录雄穗最大截面处长径和短径数据。根据因素编码表,调节切割电机脉冲信号和伸缩电机外接电机调速器输出频率,控制旋切转速与竖直进给速度。切割电机带动刀具旋转,转速稳定后可展部件工作,旋切部件以一定速度竖直进给切割雄穗,计算并记录切割力。

4.1.3 试验结果分析

通过 Design-Expert 软件进行响应面试验,分析试验数据的回归性和因素方差,确定各因素对指标的影响显著性,建立单位切割力 Y 回归模型。试验设计及结果如表 7 所示, X_1 、 X_2 与 X_3 为因素编码值,每组试验重复 10 次,结果取平均值。

4.1.3.1 单位切割力响应面分析

检验试验数据回归模型显著性,比较模型显著性检测、失拟项检测及相关性检验^[22]的数据,选择二阶模型拟合单位切割力 Y 关于各试验因素的回归模型

$$Y = 10.56 + 0.1825X_1 + 0.1600X_2 - 0.1150X_3 - 0.0150X_1X_2 - 0.1050X_1X_3 + 0.0750X_2X_3 + 0.9590X_1^2 + 0.8940X_2^2 + 0.9290X_3^2 \quad (14)$$

回归模型的方差分析结果如表 8 所示,回归模型达到极显著水平 ($P < 0.0001$),失拟项不显著 ($P > 0.05$),拟合精度好。在旋切转速、竖直进给速度与刀具刃角 3 个单因素中,旋切转速对单位切割

表 7 台架试验设计与结果

Tab.7 Design and results of bench experiment

试验编号	因素			Y/MPa
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	0	12.12
2	1	-1	0	12.51
3	-1	1	0	12.35
4	1	1	0	12.68
5	-1	0	-1	12.32
6	1	0	-1	12.90
7	-1	0	1	12.21
8	1	0	1	12.37
9	0	-1	-1	12.31
10	0	1	-1	12.60
11	0	-1	1	12.02
12	0	1	1	12.61
13	0	0	0	10.47
14	0	0	0	10.52
15	0	0	0	10.50
16	0	0	0	10.63
17	0	0	0	10.69

表 8 回归过程方差分析

Tab.8 Anova results of regression process

数据源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	12.790	9	1.420	124.18	<0.000 1
X_1	0.266	1	0.266	23.28	0.001 9
X_2	0.205	1	0.205	17.89	0.003 9
X_3	0.106	1	0.106	9.24	0.018 8
X_1X_2	0.001	1	0.001	0.079	0.787 3
X_1X_3	0.044	1	0.044	3.85	0.090 4
X_2X_3	0.023	1	0.023	1.97	0.203 7
X_1^2	3.870	1	3.870	338.28	<0.000 1
X_2^2	3.370	1	3.370	293.98	<0.000 1
X_3^2	3.630	1	3.630	317.45	<0.000 1
残差	0.080	7	0.011		
失拟项	0.045	3	0.015	1.71	0.301 6
纯误差	0.035	4	0.009		

力的影响最大,竖直进给速度次之,刀具刃角影响最小;旋切转速与竖直进给速度的影响极显著,刀具刃

角的影响显著,三者都影响单位切割力。因素二次作用中,旋切转速、竖直进给速度及刀具刃角均对单位切割力影响极显著。

模型可信度检验分析结果:决定系数 R^2 为 0.993 8,接近 1,模型相关性好。校正决定系数和预测决定系数均大于 0.9,回归模型不存在其它显著性影响因素。模型变异系数小于 10%,信噪比为 27.913 0 且大于 4,说明试验数据精确度和可信度高,模型精度好。

因素交互作用对单位切割力影响的响应面如图 11 所示。图 11a 表示当刀具刃角为 30° 时,竖直进给速度和旋切转速两因素交互作用对单位切割力的影响规律。当竖直进给速度为 5 mm/s 时,随着旋切转速的增大,单位切割力呈先减小后增大的变化趋势,旋切转速约为 3 925 r/min 时,单位切割力取得最小值;当旋切转速为 3 500 r/min 时,随着竖直进给速度的增大,单位切割力呈先减小后增大的变化趋势,竖直进给速度约为 5.8 mm/s 时,单位切割力最小。图 11b 表示竖直进给速度为 6 mm/s 时,刀具刃角和旋切转速两因素交互作用对单位切割力的影响规律。刀具刃角和旋切转速两因素中任意因素为低水平时,随着另一因素增大,单位切割力均呈先减小后增大的变化趋势。当刀具刃角为 15° 、旋切转速约为 3 880 r/min 时,单位切割力取得最小值;当旋切转速为 3 500 r/min,刀具刃角约为 33° 时,单位切割力最小。图 11c 表示旋切转速为 4 000 r/min 时,刀具刃角和竖直进给速度两因素交互作用对单位切割力的影响规律,单位切割力的变化趋势与图 11a、11b 相似,均呈现先减小后增大的变化趋势。当刀具刃角为 15° 、竖直进给速度约为 6.1 mm/s 时,单位切割力取得最小值;当竖直进给速度为 6 mm/s、刀具刃角约为 29° 时,单位切割力最小。单位切割力响应面模型残差分析如图 12 所示,表明利用响应面拟合各试验因素与单位切割力的回归模型适应性好。

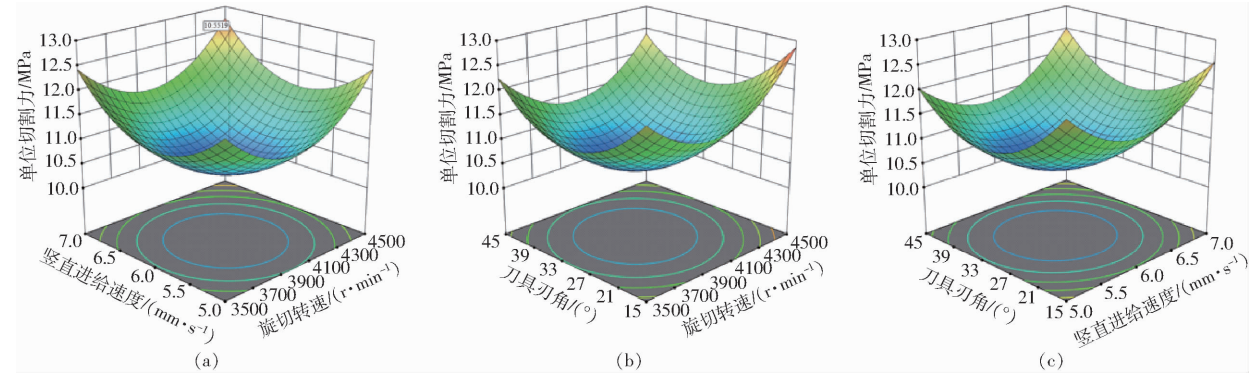


图 11 因素交互作用对单位切割力影响的响应面

Fig. 11 Response surfaces of effect of factor interaction on unit cutting force

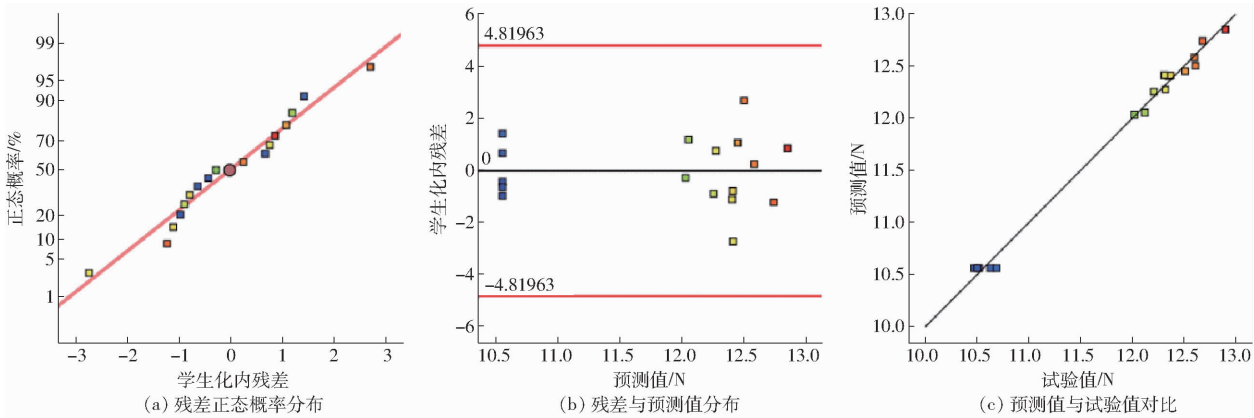


图 12 单位切割力响应面模型残差分析

Fig. 12 Residual analysis of unit cutting force response surface model

4.1.3.2 最优参数组合优化

旋切转速、竖直进给速度和刀具刃角作为优化对象,单位切割力最小值作为优化目标,优化响应面结果。优化目标及约束方程为

$$\begin{cases} \min Y(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

利用 NSGA-II 算法优化分析回归模型,获得最优参数组合:旋切转速 3 954 r/min、竖直进给速度 5.9 mm/s、刀具刃角 32°,此参数组合下单位切割力理论值为 10.54 MPa。

4.2 田间试验

4.2.1 试验条件

基于台架试验最优参数组合,重新加工刀具,于 2023 年 7 月 15 日在我国西北地区玉米制种基地开展去雄无人机田间验证试验。当天风向是西风,风速 4 m/s。制种玉米株高 1.9 ~ 2.1 m,采用覆膜宽窄行种植方式,宽行 600 mm,窄行 450 mm,平均株距 200 mm,平均含水率 82.6%,剪切强度 0.76 MPa。24 V 锂电池作为去雄系统独立电源,伸缩电机与切割电机通过电源适配电路和控制信号回路接入去雄系统,田间试验如图 13 所示。

4.2.2 试验指标

制种玉米地面去雄机械作业效果的评价指标是去雄成功率与叶片损伤率^[23]。对于去雄无人机而言,旋切装置切割雄穗时的反扭力矩导致机身晃动对无人机去雄作业效果也有重要影响,本研究在去雄成功率与叶片损伤率的基础上,引入高度波动率作为评价指标。

去雄成功率:制种玉米去雄农艺要求母本雄穗需从根部完全去除,从顶部至根部完全切除的带穗玉米植株是成功去雄玉米植株,去雄成功率 Q 计算



图 13 田间去雄试验场景

Fig. 13 Field scene of detasseling experiment

公式为

$$Q = \frac{N_1}{N} \times 100\% \quad (16)$$

式中 N ——计划去雄玉米株数,株

N_1 ——成功去雄玉米株数,株

叶片损伤率:带一、二叶去雄与不带叶去雄差异不显著^[24],去雄带叶数小于等于 2 是无损玉米植株,大于 2 是有损玉米植株,叶片损伤率 Z 计算公式为

$$Z = \frac{N_2}{N} \times 100\% \quad (17)$$

式中 N_2 ——有损伤玉米株数,株

高度波动率:去雄无人机每个作业点定高悬停所设定的对地高度为 H_i (cm);去雄无人机切除玉米雄穗过程中,切割反扭力矩导致机身晃动时的无人机机体对地高度最大波动量为 ΔH_i (cm);高度波动率 U 计算公式为

$$U = \sum_{i=1}^b \frac{|\Delta H_i|}{aH_i} \times 100\% \quad (18)$$

式中 b ——每组试验架次带穗玉米植株作业序号
 a ——每组试验架次带穗玉米植株去雄总株数,株

4.2.3 结果分析

去雄无人机根据试验目标雄穗位置信息规划去雄路径,逐一开展去雄作业。田间试验架次4次,每架次去雄12株带穗玉米植株,试验结果见表9,去雄结果如图14所示。

表 9 田间试验结果
Tab.9 Results of field experiment %

试验架次	去雄成功率	叶片损伤率	高度波动率
1	91.67	16.67	3.33
2	100	8.33	1.67
3	91.67	8.33	1.33
4	91.67	25.00	1.20
均值	93.75	14.58	1.88



图 14 田间去雄结果

Fig. 14 Field detasseling results

由田间试验可知,旋切装置可完全切除雄穗,且切割茬口平整度好。当雄穗两侧叶片开口小时,旋切装置切除雄穗连带叶片数大于2;当两侧叶片开口大时,旋切装置会损伤植株部分一叶或者二叶,经统计叶片损伤率均值为14.58%。

因部分试验玉米植株为矮小弱株且存在临近植

株遮挡现象,去雄无人机去雄成功率均值为93.75%,切除雄穗过程中,去雄无人机高度波动率均值为1.88%,整机无明显晃动,稳定性好。

5 结论

(1)基于去雄无人机作业特点和去雄农艺要求,确定了制种玉米去雄无人机旋切装置的设计要求,计算分析了刀具切割雄穗时的受力及其对无人机反扭力矩的影响,完成了装置总体结构设计,确定了旋切装置旋切范围44~150 mm,可展范围541~1 318 mm,总质量4.03 kg。

(2)通过 Solidworks Motion 优化了可展部件工作性能,利用 Explicit Dynamics 开展了雄穗切割仿真,结果表明:竖直进给切割和水平进给切割的茬口平整度优于一刀切割,且竖直进给切割的雄穗弯曲变形程度小于水平进给切割,利于无人机稳定性。因此,选取竖直进给切割作为去雄无人机的旋切方式。

(3)利用 Box - Behnken 响应面试验设计方法开展了旋切装置台架试验,确定了旋切装置切割反扭力矩最小时最优参数组合为:旋切转速3 954 r/min、竖直进给速度5.9 mm/s、刀具刃角32°,单位切割力为10.54 MPa。在此参数基础上开展去雄无人机田间验证试验,田间试验的旋切装置能将雄穗完全切除,与无人机适配后的整机叶片损伤率均值为14.58%,高度波动率均值为1.88%,满足制种玉米去雄要求。

参 考 文 献

[1] 姚前. 强化制种基地管理·保障玉米良种有效供给[J]. 中国种业, 2022(3): 43 - 45.

[2] 邹卓然, 王锦江, 赵庆南, 等. 制种玉米机械化去雄技术与装备研究现状[J]. 农业工程, 2020, 10(7): 19 - 23.
ZOU Zhuoran, WANG Jinjiang, ZHAO Qingnan, et al. Research status of seed corn emasculation technology and equipment [J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(7): 19 - 23. (in Chinese)

[3] 王林. 制种玉米生产机械化去雄初探[J]. 农业机械, 2021(11): 91 - 93.

[4] 王国新, 韩科立, 邓志刚, 等. 自走式玉米去雄机设计与试验[J]. 农业工程, 2020, 10(2): 67 - 71.
WANG Guoxin, HAN Keli, DENG Zhigang, et al. Design and test of self-propelled corn emasculation machine [J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(2): 67 - 71. (in Chinese)

[5] 陈立平, 张瑞瑞, 丁晨琛, 等. 玉米去雄巡检机器人及利用其进行去雄的方法: CN116098056B[P]. 2023 - 08 - 01.

[6] XIA L, ZHANG R, CHEN L, et al. Monitor cotton budding using SVM and UAV images[J]. Applied Sciences, 2019, 9(20): 4312.

[7] HU P, ZHANG R, YANG J, et al. Development status and key technologies of plant protection UAVs in China: a review[J]. Drones, 2022, 6(11): 354.

[8] 杨普, 赵远洋, 李一鸣, 等. 基于多源信息融合的农业空地一体化研究综述[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 185 - 196.
YANG Pu, ZHAO Yuanyang, LI Yiming, et al. Review of research on integration of agricultural air-ground integration based on multi-source information fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 185 - 196. (in Chinese)

[9] 任万军, 吴振元, 李蒙良, 等. 水稻无人机撒肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 88 - 98.
REN Wanjun, WU Zhenyuan, LI Mengliang, et al. Design and experiment of UAV fertilization spreader system for rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 88 - 98. (in Chinese)

[10] 高学梅, 游兆延, 吴惠昌, 等. 基于无人机平台的绿肥种子撒播装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11):

- 76 – 85.
- GAO Xuemei, YOU Zhaoyan, WU Huichang, et al. Design and experiment of green manure seed broadcast sowing device based on unmanned aerial vehicle platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 76 – 85. (in Chinese)
- [11] 吴昆, 宋月鹏. 农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 1 – 20.
- WU Kun, SONG Yuepeng. Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 1 – 20. (in Chinese)
- [12] 吴守一. 农业机械学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [13] 梁栋, 张赵建, 畅博彦, 等. 含双平行四边形结构支链的 SCARA 并联机构研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 422 – 434.
- LIANG Dong, ZHANG Zhaojian, CHANG Boyan, et al. Novel SCARA parallel mechanism with double parallelogram branches [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 422 – 434. (in Chinese)
- [14] 王汝贵, 张玮, 陈培民, 等. 新型剪叉折叠机构的运动性能[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(1): 42 – 47.
- WANG Rugui, ZHANG Yi, CHEN Peimin, et al. Study on kinematic performance of a novel scissor deployable mechanism [J]. Machine Design and Research, 2023, 39(1): 42 – 47. (in Chinese)
- [15] 计东, 胡熙, 哲旋瑞, 等. 双排移栽机械手联动式高速移栽装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 126 – 133.
- JI Dong, HU Xi, ZHE Xuanrui, et al. Design and experiment of double row transplanting manipulator linkage high speed transplanting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 126 – 133. (in Chinese)
- [16] 宋月鹏, 王征, 吴昆, 等. 金属陶瓷自磨刃刀具对苜蓿低损伤切割机理分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 421 – 426.
- SONG Yuepeng, WANG Zheng, WU Kun, et al. Fabrication of self-sharpening blades with metaloceramics materials and low-damaged cutting mechanism of alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 421 – 426. (in Chinese)
- [17] 赖庆辉, 袁海阔, 胡子武, 等. 滚筒板齿式三七种苗分离装置结构设计及试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 121 – 129.
- LAI Qinghui, YUAN Haikuo, HU Ziwu, et al. Design and experiment on seedling separation device of *Panax notoginseng* seedlings based on roller zigzag mechanism[J]. Transactions of the Chinese Soci for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 121 – 129. (in Chinese)
- [18] 郇晓龙, 尤泳, 王德成, 等. 王草收获机旋转刀盘式平茬切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 112 – 124.
- HUAN Xiaolong, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of rotary cutter disc type flat stubble cutting device for king grass harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 112 – 124. (in Chinese)
- [19] 李涛, 魏训成, 姜伟, 等. 甘薯秧蔓收获特性试验装置研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 166 – 175.
- LI Tao, WEI Xuncheng, JIANG Wei, et al. Test bench study on harvesting characteristics of sweet potato vines [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.1): 166 – 175. (in Chinese)
- [20] 张振国, 赵敏义, 邢振宇, 等. 红花采收机双动对切式末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 160 – 170.
- ZHANG Zhenguo, ZHAO Minyi, XING Zhenyu, et al. Design and test of double-acting opposite direction cutting end effector for safflower harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 160 – 170. (in Chinese)
- [21] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云, 等. 丘陵山地胡麻联合收获机复式清选系统仿真优化与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 93 – 102, 113.
- SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Simulation optimization and experiment on compound cleaning system of hilly area flax combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 93 – 102, 113. (in Chinese)
- [22] 胡静, 张品乐, 吴磊, 等. 基于响应面法的 ECC 基体力学性能研究与配合比优化[J]. 材料导报, 2022, 36(增刊): 173 – 177.
- HU Jing, ZHANG Pinle, WU Lei, et al. Study on mechanical properties of cementitious matrix based on response surface method and optimization of the fitting ratio[J]. Materials Reports, 2022, 36(Supp.): 173 – 177. (in Chinese)
- [23] 王锦江, 陈志, 董祥, 等. 制种玉米去雄机轮式抽雄部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 75 – 81.
- WANG Jinjiang, CHEN Zhi, DONG Xiang, et al. Design and experiment for roller type tassel-removal component in seed corn detasseling machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 75 – 81. (in Chinese)
- [24] 刘永刚, 石强, 高翔. 提高制种玉米母本去雄质量的措施[J]. 种子科技, 2014, 32(9): 47 – 48.