doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.011

# Y 型刀齿式棉秆粉碎还田装置优化设计与试验

邢剑飞[1,2]　朱冠三[2,3]　王旭峰[2,3]　汤修映[1,3]　胡　灿[2,3]　王　龙[2,3]　李文涛[2,3]

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300;
3. 南疆特色农林产物利用与装备兵团重点实验室, 阿拉尔 843300)

**摘要:** 为适应新疆棉区棉秆还田与残膜回收协同作业需求,针对现有棉秆粉碎-残膜回收机作业中棉秆粉碎合格率低、粉碎物掉落率高等问题,设计一款残膜回收机前置式 Y 型刀齿式棉秆粉碎还田装置,该装置通过刀齿式甩刀粉碎与螺旋输送器侧抛协同作业,有效提高棉秆粉碎合格率、降低粉碎物掉落率,并减少输送堵塞发生。本研究阐述了装置的工作原理,对刀齿式甩刀、螺旋输送器等关键部件进行了结构优化设计,建立了甩刀运动轨迹方程,确定粉碎装置作业的影响因素,使用 MBD-EDEM 多体动力学-离散元联合耦合仿真,建立粉碎装置与秸秆的相互作用模型,选取甩刀数量、刀轴转速、前速度作为试验因素,以棉秆粉碎合格率及粉碎掉落率为评价指标,进行三因素三水平仿真试验,试验结果表明,当螺旋甩刀为 32 片、刀轴转速为 2 100 r/min、前进速度为 1.5 m/s 时,破碎性能较优,棉秆粉碎合格率为 93.05%、粉碎掉落率为 2.5%,并在最优组合下对刀轴进行分析,通过 ANSYS 对刀辊进行模态分析,得到粉碎刀辊最低阶数的固有频率为 73.541 Hz,远高于工作频率(31.67~38.33 Hz),不会产生共振,仿真结果表明装置结构与作业工况满足设计要求。田间试验结果表明,棉秆粉碎合格率为 94.3%,抛撒不均匀度为 13.8%,平均留茬高度为 75.6 mm,均优于国家标准要求。

**关键词:** 棉花秸秆; 粉碎还田装置; 刀齿式

**中图分类号:** S224.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-1298(2026)07-0121-12　　**OSID:**

# Optimal Design and Experiment of Y-type Toothed Cotton Stalk Chopping and Returning Device

XING Jianfei[1,2]　ZHU Guansan[2,3]　WANG Xufeng[2,3]　TANG Xiuying[1,3]　HU Can[2,3]　WANG Long[2,3]　LI Wentao[2,3]

(1. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*
2. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar* 843300, *China*
3. *Xinjiang Production and Construction Corps(XPCC) Key Laboratory of Utilization and Equipment of Special Agricultural and Forestry Products in Southern Xinjiang, Alar* 843300, *China*)

**Abstract:** In order to meet the needs of collaborative operation of cotton stalk returning to field and residual film recovery in Xinjiang cotton area, aiming at the problems of low qualified rate of cotton stalk crushing and high falling rate of crushed materials in the operation of existing cotton stalk crushing-residual film recovery machine, a Y-type cutter-tooth cotton stalk crushing and returning device with front-mounted residual film recovery machine was designed. The device can effectively improve the qualified rate of cotton stalk crushing, reduce the falling rate of crushed materials and reduce the occurrence of conveying blockage through the collaborative operation of cutter-tooth blade crushing and screw conveyor side throwing. The working principle of the device was expounded, and the structural optimization design of key components such as knife-tooth flail and screw conveyor was carried out. The trajectory equation of the flail was established, and the influencing factors of operation of crushing device were determined. The MBD-EDEM multi-body dynamics-discrete element coupling simulation was used to establish the interaction model between the crushing device and the straw. The number of flails, the rotation speed of knife shaft and forward speed were selected as the experimental factors. The three-factor and three-level simulation test was carried out with the cotton stalk crushing pass rate and the crushing

收稿日期: 2025-12-30　修回日期: 2026-01-15

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2023YFD1701902-1)和兵团重点领域科技攻关项目(2024AB029)

**作者简介:** 邢剑飞(1994—),男,博士生,塔里木大学讲师,主要从事南疆特色农业装备研究,E-mail: 120200012@taru.edu.cn

**通信作者:** 汤修映(1970—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备及检测装备研究,E-mail: txying@cau.edu.cn

drop rate as the evaluation index. The test results showed that when the screw flail was 32, When the rotation speed of the cutter shaft was 2 100 r/min and the forward speed was 1.5 m/s, the crushing performance was better. The qualified rate of cotton stalk crushing length was 93.05%, and the crushing drop rate was 2.5%. The cutter shaft was analyzed under the optimal combination. The modal analysis of the cutter roller was carried out by ANSYS. The natural frequency of the lowest order of the crushing cutter roller was 73.541 Hz, which was much higher than the working frequency (31.67 ~ 38.33 Hz), and no resonance occurred. The simulation results showed that the device structure and operating conditions met the design requirements. The field test results showed that the qualified rate of cotton stalk crushing was 94.3%, the unevenness of scattering was 13.8%, and the average stubble height was 75.6 mm, which were better than that of the national standard requirements.

**Key words**: cotton stalks; grinding returning device; knife-tooth type

## 0 引言

新疆为我国主要优质棉生产基地,播种面积及产量连续多年位居全国第一,2024 年新疆棉花播种面积为 $2.4\times10^6$ $hm^2$,产量为 $5.7\times10^6$ t,分别占全国播种面积和产量的 84.5% 和 92.2%[1-2]。棉秆作为棉花的主要副产物,按照棉花的草谷比为 5 进行测算[3],新疆棉秆年产量已经超过 $2.8\times10^6$ t。棉秆主要含有纤维素、半纤维素及木质素,并且还含有少量果胶、蛋白质等,是一种优质的可再生生物质资源[4],然而,棉秆木质化程度显著高于玉米、小麦等作物秸秆,导致棉秆资源化利用水平整体偏低[5]。目前新疆棉秆处置方式主要包括粉碎还田、就地焚烧及少量回收饲料化等,其中棉秆粉碎还田是提升土壤有机质、降低露天焚烧污染、促进保护性耕作的重要途径,通过棉秆破碎还田可改善土壤结构、增强地力并促进养分循环[6-7]。

新疆棉区以地膜覆盖栽培为主,棉秆粉碎与残膜回收成为棉花收获后治理体系中的关键环节。棉秆粉碎质量不仅影响棉秆在土壤中的分解速率与还田效果,也会通过作业过程夹带至残膜打包箱,直接影响残膜回收的含杂率与拾净率。因此开展棉秆粉碎还田残膜回收协同作业的粉碎装置研究具有明显的生态效益及应用价值。针对秸秆粉碎装置研究,颜利民等[8]针对棉秆抛撒还田后碎秆易成行堆积研究了侧抛式棉秆粉碎还田装置,对 Y 型甩刀刃线进行优化,增加了有效切割次数,提升了棉秆粉碎合格率和抛送效果,棉秆粉碎合格率为 93.9%。由佳翰等[9]设计的 4JSM-2000 型棉秆粉碎与残膜回收联合作业机,优化了甩刀的排列密度与方式,明确甩刀密度为 0.26 片/cm,棉秆粉碎合格率为 91.8%。卢登明等[10]研制了 1CMJ-200 型残膜回收与秸秆粉碎还田联合作业机,粉碎装置主要由甩刀总成、螺旋输送机构组成,运行过程可降低膜面杂质含量,谢建华等[11]设计了棉秆粉碎及地膜随动集条机,甩刀转速最小值为 1 800 r/min,甩刀将粉碎后的棉秆抛送至集条装置后方侧面交接行,有效避免了秸秆粉碎残膜回收联合作业时棉秆与残膜同步捡拾的问题。王学农等[12]设计的 4JSM-1800 型棉秸秆还田及残膜回收联合作业机,于风送式粉碎装置基础上增设风板式鼓风机构,由 4 ~ 6 片扇叶构成,通过高速旋转在导流罩内形成负压,提升粉碎效果并降低残膜含杂率。李亚萍等[13]设计的 4JH-220 型秸秆粉碎还田机,增设自适应摆动尾轮,能依据地面起伏自动调整,实现秸秆高效粉碎还田。综上,现有研究多通过优化甩刀转速、排列密度、增设风板提高粉碎合格率与抛送能力,仍然存在粉秆合格率低、掉落率高、秸秆柔性化差等问题,需进一步优化甩刀齿形、排列方式和作业速度。

为解决上述问题,本文结合新疆棉花种植农艺要求,以棉秆粉碎合格率、平均留茬高度等为指标,对 Y 型甩刀进行优化设计,并设计螺旋输送装置,分析不同甩刀齿形、甩刀排列方式和作业速度对粉碎还田效果的影响,采用 RecurDyn 和 EDEM 进行耦合仿真,验证机具作业的可行性,并开展田间试验,验证最优作业参数,以期提高粉碎作业稳定性与合格率,降低掉落率,提升残膜拾净率。

## 1 棉秆粉碎还田装置结构与特点

### 1.1 棉花种植农艺及整机结构

新疆棉花种植整体分布较广,为实现机械化采收作业,目前主要推广一膜三行等间距机采棉模式(76 cm + 76 cm)和一膜六行宽窄行机采棉栽培模式(66 cm + 10 cm)[14-16],机采棉种植模式如图 1 所示,为兼顾农机及农艺融合作业要求,设计的 Y 型刀齿式棉秆粉碎还田装置(卧式)位于残膜回收机前方,主要由牵引架、驱动轴、带传动系统、张紧机构、限深轮、粉碎装置、固定刀齿、输送装置构成,整机结构如图 2 所示。

### 1.2 工作原理

机具采用牵引方式与拖拉机连接,拖拉机后输

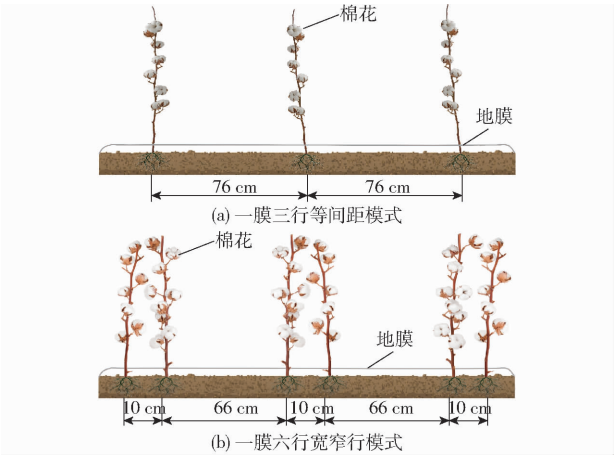



图 1　机采棉种植模式

Fig. 1　Cotton planting mode

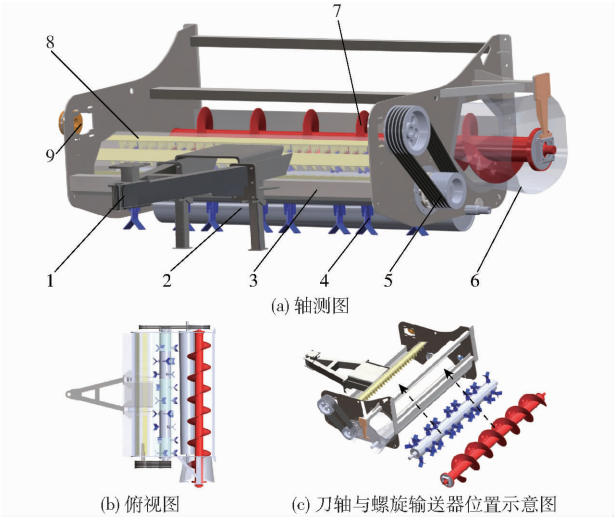



图 2　Y 型刀齿式棉秆粉碎还田装置

Fig. 2　Cotton stalk crushing and incorporation device with Y-shaped blade teeth

1. 牵引架　2. 限深轮　3. 机架　4. 粉碎装置　5. 粉碎装置传动系统　6. 排秆出口　7. 输送装置　8. 固定刀齿　9. 输送装置传动系统

出轴与机具传动轴进行连接提供动力，通过限深轮控制整机的作业高度，保证棉秆残留高度，作业过程中传动系统会将动力传递给粉碎装置和输送装置，机具前进过程中，秸秆在粉碎装置顺时针高速旋转的过程中进行破碎，棉秆在“甩刀-定刀”剪切作用及物料与壁面的摩擦下进一步破碎，甩刀旋转时对秸秆施加切向力，使其获得高速动能，配合高速旋转产生的离心力与负压气流，棉秆沿切线方向抛向后侧的螺旋输送装置，经导流板侧抛至棉田右侧，实现棉秆粉碎还田。

### 1.3　粉碎过程

棉秆从进入粉碎仓到抛离至输送装置，整体分为压弯进仓、棉秆粉碎、负压后抛 3 个阶段，如图 3 所示。粉碎装置前侧机架和喂入导向挡板会将棉秆压弯，有序导入粉碎装置，随后粉碎装置通过高速旋转，在甩刀的冲击剪切力作用下形成一次粉碎，在定刀和甩刀相互配合下形成二次剪切，进一步被切碎细化，在负压吸力与甩刀抛送力的双重作用下，棉秆碎段被快速抛送至输送装置，完成整个粉碎过程。

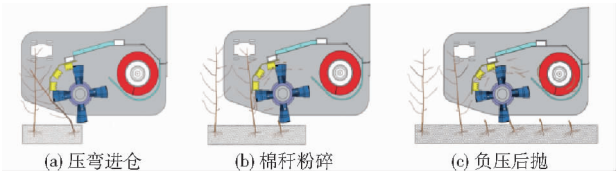



图 3　棉秆粉碎过程示意图

Fig. 3　Schematics of cotton stalk crushing process

### 1.4　技术参数

Y 型刀齿式棉秆粉碎还田装置安装在棉田残膜回收机前侧，形成棉秆粉碎与残膜回收联合作业，主要技术参数如表 1 所示。

**表 1　机具主要技术参数**

**Tab. 1　Main technical parameters of implement**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 长 × 宽 × 高/(mm × mm × mm) | 6 170 × 2 850 × 1 850 |
| 作业幅宽/mm | 2 200 |
| 甩刀数量/片 | 32 |
| 定刀数量/片 | 33 |
| 刀具末端回转半径/mm | 280 |
| 前进速度/(km·h$^{-1}$) | 6 ~ 8 |
| 粉碎刀轴转速/(r·min$^{-1}$) | 1 800 ~ 2 300 |
| 侧向输送轴转速/(r·min$^{-1}$) | 110 |
| 配套功率/kW | 88.2 ~ 117.6 |
| 棉秆粉碎合格率/% | ≥90 |

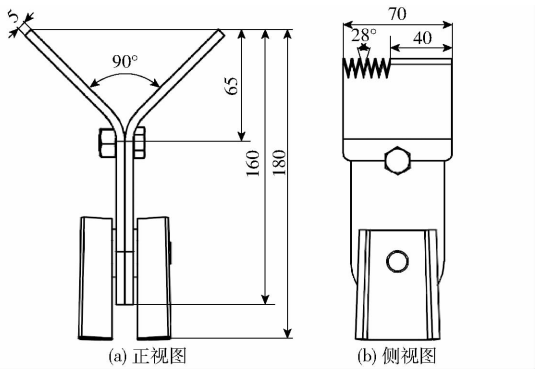
## 2　关键部件设计

### 2.1　粉碎装置设计

#### 2.1.1　粉碎刀具设计

粉碎装置主要由粉碎刀轴、甩刀和定刀构成，其中甩刀类型以 Y 型、直刀型和锤抓型为主[17]，Y 型甩刀整体质量和体积小，其刀刃角度特殊，在旋转过程中，对棉秆切割和粉碎路径丰富，能增加有效切割次数，粉碎效果好。直刀型甩刀结构简单，制造成本低，但是刀刃切割角度单一，粉碎效果一般；锤抓型甩刀体积及质量较高，作业过程中能有效破碎秸秆的硬结构，粉碎效果好，但是会增加动力消耗[11]，因此本设计选择 Y 型甩刀，结合新疆棉秆物理特性，对甩刀刃结构进行优化设计，增加了刀具与棉秆之间的接触和撕裂次数，提升了甩刀的作业效果，为半刃半齿型，其结构如图 4 所示。

甩刀的尺寸影响机具的作业效果，甩刀长度过大，整体体积和质量会增加，增加功耗，作业过程会接触地面，对刀片造成损伤，装置的稳定性降低，甩




(a) 正视图 (b) 侧视图

图 4 甩刀结构示意图

Fig. 4 Structure diagrams of flail knife

刀长度过小,留茬高度会增加,粉碎效果变差,要提高刀轴转速来粉碎棉秆,增加功耗,刀具厚度、宽度也会影响粉碎效果,若设计不合理会存在漏切、断裂等情况。本装置结合棉秆作业要求,确定 Y 型甩刀长度为 160 mm,加刀座总体长度为 180 mm,为保证作业强度,甩刀厚度为 5 mm,宽度为 70 mm,开口角为 90°,优化后的甩刀刃口部分半刃长 40 mm,齿部长 30,齿间中心距为 5 mm,角度为 28°。

定刀固定于粉碎罩壳内侧,与粉碎甩刀相互配合切碎,刀与定刀之间的间距,会影响棉秆的粉碎长度。根据现有研究表明,当棉秆含水率偏高,粉碎质量便会显著下滑。较小的动、定刀间隙有助于提高秸秆粉碎品质,但是间隙过小,甩刀极易与定刀发生碰撞,会造成损害,引发安全风险。依据 GB/T 24675.6—2021《保护性耕作机械 第 5 部分:秸秆粉碎还田机》中的规定,粉碎棉秆长度不得超过 200 mm。结合棉秆物理特性,结合棉秆粉碎要求,将相邻两定刀的距离确定为 100 mm,定刀的排列布局见图 5,定刀通过焊接固定至定刀板,共计 3 排定刀,保证粉碎效果。

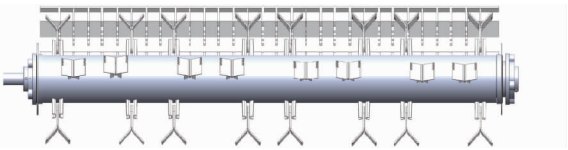


图 5 定刀排列布局

Fig. 5 Fixed blade configuration

### 2.1.2 粉碎刀具排布

甩刀排布影响装置的作业效果,甩刀数量不足易导致棉秆漏切,降低粉碎合格率;数量过多则会增大机具动力消耗,刀刃间气流干扰也会阻碍棉秆碎段抛送。因此甩刀数量通常需结合作业幅宽、刀具排布密度来确定[18-19],以实现粉碎效率与能耗的平衡,计算式为

$$C = N/L \tag{1}$$

式中 $C$——甩刀排布密度,片/m

$N$——甩刀数量,片

$L$——装置作业幅宽,mm

Y 型甩刀与粉碎辊通过铰接的方式进行连接,根据新疆棉田作业要求,粉碎辊幅宽为 2.2 m,通过试验对比,甩刀的排列密度取 14 ~ 15 片/m,本文设计粉碎刀辊直径为 200 mm,为确保粉碎机构作业时具备优良的动态平衡性能、运行稳定性及防堵塞能力,粉碎刀在粉碎辊上采用 4 螺旋排布。最终计算得 $N = 32$ 片,每组螺旋线上 8 组甩刀,单条螺旋线上相邻两组甩刀轴向间距为 275 mm,单螺旋线上相继与棉秆接触甩刀的相位差为 45°。结合粉碎装置甩刀的排列,确定单条螺旋线上相邻两组甩刀相位差 $\beta$ 计算公式为

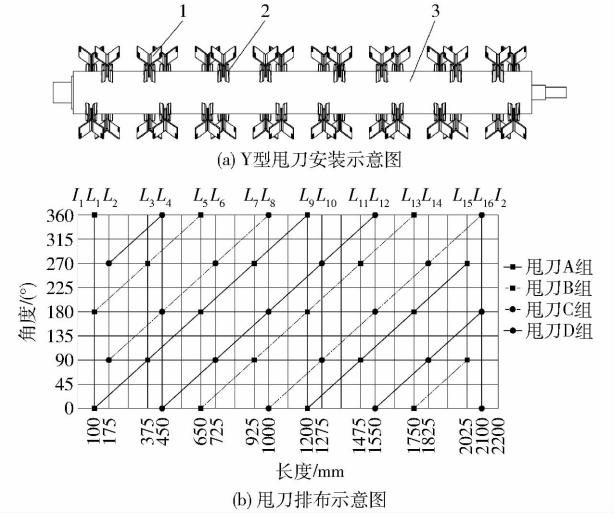
$$\beta = \begin{cases} 2\alpha_n & (n \leqslant 20) \\ 4\alpha_n & (20 < n \leqslant 40) \\ 8\alpha_n & (n > 40) \end{cases} \tag{2}$$

式中 $\beta$——单条螺旋线上相邻两组甩刀相位差,(°)

$\alpha_n$——单螺旋线上相继与棉秆接触甩刀的相位差,(°)

$n$——单条螺旋线上甩刀组数

得 $n = 8$,代入公式(2),得到单条螺旋线上相邻两组甩刀相位差为 90°。最终安装与排布如图 6 所示,初始相位角分别为 0°、90°、180°、270°。




(a) Y型甩刀安装示意图

(b) 甩刀排布示意图

图 6 刀具安装与排布图

Fig. 6 Schematics of blade installation and arrangement

1. Y 型甩刀 2. 切茬刀座 3. 粉碎刀轴

### 2.1.3 粉碎甩刀转速分析

棉秆粉碎为无支撑切割,要求切割线速度较高,粉碎刀轴转速直接影响棉秆的粉碎效果[20],如图 7 所示,在粉碎刀轴中心建立工件坐标系,甩刀末端刀刃任意一点坐标为 $A(x,y)$,建立刀具的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = v_0 t + (R_1 + h)\cos(\omega t) \\ y = (R_1 + h)\sin(\omega t) \end{cases} \tag{3}$$

式中　$v_0$——机具前进速度，m/s

$\omega$——粉碎辊角速度，rad/s

$h$——$Y$ 型甩刀长度，mm

$R_1$——粉碎辊半径，mm

$t$——作业时间，s

对公式(3)求一阶导得到甩刀的速度方程为

$$\begin{cases} v_x = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = v_0 - \omega(R_1 + h)\sin(\omega t) \\ v_y = \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = \omega(R_1 + h)\cos(\omega t) \end{cases} \tag{4}$$

因此，粉碎甩刀的绝对速度 $v_a$ 与时间 $t$ 的运动方程为

$$v_a = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{[v_0 - \omega(R_1 + h)\sin(\omega t)]^2 + [\omega(R_1 + h)\cos(\omega t)]^2} = \sqrt{v_0 + \omega^2(R_1 + h)^2 - 2\omega(R_1 + h)v_0\sin(\omega t)} \tag{5}$$

式中　$v_x$——甩刀 $x$ 轴方向速度，m/s

$v_y$——甩刀 $y$ 轴方向速度，m/s

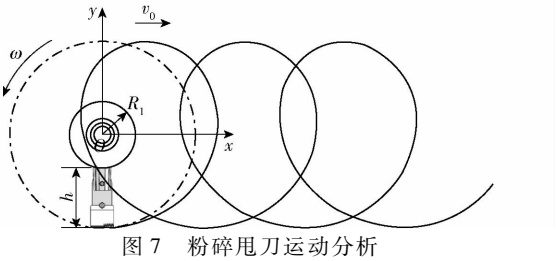



图 7　粉碎甩刀运动分析

Fig. 7　Motion analysis of crushing flail blades

已有研究表明，棉秆切割线速度为 30 ~ 48 m/s，粉碎刀轴的转速为 2 100 r/min 时粉碎装备会在不同秸秆类型作业中达到良好的粉碎效果。由于棉秆木质素较高，相较小麦、玉米等秸秆质地较为坚硬，结合农业机械设计、物料特性等，动刀线速度初步设计最大线速度为 48 m/s。为确保棉秆粉碎和抛送效果，粉碎刀具速度方向与机具前进速度方向相反，即 $\omega t = 2k\pi + \pi/2, k \in \mathbf{N}$，$v_a$ 有最小值 $\omega_1(R_1 + h) - v_0$，当作业速度最小值取 1 m/s 时，代入公式(5)得出粉碎辊最小转速为 1 800 r/min，与颜利民等[8]、张佳喜等[21]研究结果相符，在 1 800 ~ 2 200 r/min 范围内。

**2.1.4**　甩刀平衡校核

为保障刀具有效切割、作业性能稳定等要求，32 组棉秆甩刀在粉碎轴上采用 4 条螺旋排布，4 条螺旋线相位差为 90°，由于甩刀通过销和螺栓铰接在粉碎轴上，刀与刀轴构成一个多刚体的转子，因此，作业过程中高速旋转的甩刀在切割棉秆残茬时，会产生较大的离心惯性。作业过程中产生较小的偏摆也会恢复平衡位置，其切割力、振动都具有随机性，因此需要考虑旋转过程平衡校核，甩刀高速旋转时由于惯性力作用，将甩刀和刀轴视为刚体进行平衡校核，对甩刀进行力的平衡校核，建立如图 8 所示笛卡尔坐标系。

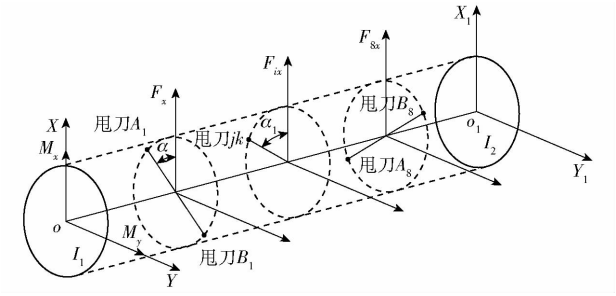



图 8　甩刀力的平衡校核

Fig. 8　Balance check of flail force

刀具安装排布如图 6 所示，甩刀共 32 片，分为 4 组以螺旋线形式排布于刀轴，将 4 组甩刀分为 $A$、$B$、$C$、$D$，每组甩刀由左至右为 1 ~ 8 号刀，为方便计算甩刀矢径 $\boldsymbol{r}$ 取其质心与轴心距离，甩刀相同质量都为 $m$，刀轴转速为 $n_y$。分析组合甩刀 4 条螺旋线排列展开图可知，32 片甩刀分布于 16 个回转面，设 16 个回转面为 $L_1$、$L_2$、…、$L_{16}$，点 $O$ 与平面 $Z$ = 2 200 mm 的回转面为 $I_1$、$I_2$。

甩刀编号第 $j$ 排第 $k$ 把，该矢径方向与坐标系 $X$ 轴的夹角为 $\alpha_{jk}$，如图 8 所示，笛卡尔坐标系中该回转面所受的惯性力在 $X$、$Y$ 方向的分量可通过所有甩刀的贡献叠加得到，静平衡分析中回转面满足公式

$$\begin{cases} F_{iX} = \sum\limits_{j,k} m_{jk}\boldsymbol{r}_{jk}\cos\alpha_{jk} \\ F_{iY} = \sum\limits_{j,k} m_{jk}\boldsymbol{r}_{jk}\sin\alpha_{jk} \end{cases} \tag{6}$$

式中　$F_{iX}$——第 $i$ 个回转面 $X$ 轴方向合力

$\boldsymbol{r}_{jk}$——第 $j$ 排第 $k$ 片刀的矢量半径

$F_{iY}$——第 $i$ 个回转面 $Y$ 轴方向合力

$m_{jk}$——第 $j$ 排的第 $k$ 片甩刀质量

两个方向上的合力均为零，即：$F_{iX} = 0$；$F_{iY} = 0$。

$L_1 \sim L_{16}$ 回转面均满足静平衡条件。

$I_1$ 与 $I_2$ 回转面为安装粉碎甩刀所在平面，因此以平面 $I_1$、$I_2$ 为平衡基面进行动平衡分析。其中 $I_1$ 回转面分析公式为

$$\boldsymbol{M}_{jk} = m_{jk}\boldsymbol{r}_{jk}\frac{L_{jkI2}}{L_{I1I2}} = (m_{jk}\boldsymbol{r}_{jk})I_1 \tag{7}$$

式中　$\boldsymbol{M}_{jk}$——甩刀在 $I_1$ 基面带方向的质径积

$L_{jkI2}$——第 $jk$ 个甩刀所在回转面到 $I_2$ 回转面的距离

$L_{I1I2}$——两个基面的距离(2 200 mm)

满足公式

$$\begin{cases} \boldsymbol{M}_x = \sum\limits_{\lambda\in\{A,B\}}\sum\limits_{j\in\{1,3,5,7\}}(m_{\lambda j}\boldsymbol{r}_{\lambda j}) + \sum\limits_{\lambda\in\{C,D\}}\sum\limits_{j\in\{2,4,6,8\}}(m_{\lambda j}\boldsymbol{r}_{\lambda j}) = 0 \\ \boldsymbol{M}_y = \sum\limits_{\lambda\in\{C,D\}}\sum\limits_{j\in\{1,3,5,7\}}(m_{\lambda j}\boldsymbol{r}_{\lambda j}) + \sum\limits_{\lambda\in\{A,B\}}\sum\limits_{j\in\{2,4,6,8\}}(m_{\lambda j}\boldsymbol{r}_{\lambda j}) = 0 \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{M}_x = \sum\limits_{n=1}^{8}\sum\limits_{\lambda\in S(n)}(m_{\lambda n}\boldsymbol{r}_{\lambda n}) = 0 \\ \left(S(n) = \begin{cases}\{A,B\} & (n\text{ 为 }1,3,5,7)\\ \{C,D\} & (n\text{ 为 }2,4,6,8)\end{cases}\right) \\ \boldsymbol{M}_y = \sum\limits_{f=1}^{8}\sum\limits_{\lambda\in S(f)}(m_{\lambda f}\boldsymbol{r}_{\lambda f}) = 0 \\ \left(S(f) = \begin{cases}\{A,B\} & (f\text{ 为 }2,4,6,8)\\ \{C,D\} & (f\text{ 为 }1,3,5,7)\end{cases}\right) \end{cases} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_x + \boldsymbol{M}_y = 0 \tag{10}$$

式中 $\boldsymbol{M}_x$、$\boldsymbol{M}_y$——回转基面 $I_1$ 中 $X$、$Y$ 的力矩矢量和

$\boldsymbol{M}$——$I_1$ 回转面总矢量和

同理可得 $I_1$、$I_2$ 两回转基面矢量均为零，高速旋转时能保持平稳，故甩刀排布和设计符合转子动平衡条件。

## 2.2 螺旋输送器设计

### 2.2.1 螺旋输送器转速分析

螺旋输送器与粉碎装置的刀轴平行，在粉碎刀轴后侧，通过轴承座安装在壳体内部，输送器旋转方向和粉碎装置一致。输送器的作用是将前侧粉碎的棉秆茬集中至一侧排出料口，为了提高残茬输送的顺畅性，减少缠绕和堵塞现象的发生，根据文献[8]可知，新疆棉田平均棉秆粉碎量为 4.5 t/hm$^2$，机具按照实际工作幅宽 2.2 m、作业速度 7 km/h 计算，喂入量为 7.9 t/h，根据《农业机械设计手册》[19]可知螺旋输送器的输送量应大于机具的最大喂入量，即

$$\begin{cases} Q = \dfrac{\pi}{24}[(D_L - 2\lambda)^2 - d^2]\psi S n'\rho k \times 10^{-10} \\ Q \geqslant q \end{cases} \tag{11}$$

式中 $Q$——体积输送量，t/h

$D_L$——螺旋叶片的外径，mm

$d$——螺旋输送器轴直径，mm

$S$——相邻两叶片的螺距，mm

$\lambda$——叶片与侧壁的间隙，mm

$n'$——螺旋输送器转速，r/min

$\psi$——填充系数

$\rho$——棉秆堆积密度，kg/m$^3$

$k$——倾斜输送系数

$q$——棉秆最大喂入量，t/h

南疆棉秆粉碎后的物理堆积密度取 120 kg/m$^3$，填充系数取决于物料粒度、形状以及含水率[9,22]，结合南疆棉秆条件填充系数取 0.2，本装置设计螺旋输送器外径为 420 mm，芯轴直径为 150 mm，螺距为 380 mm，倾斜输送系数取 1。计算可得输送轴转速 $n' \geqslant 104$ r/min 时，棉秆残茬顺利通过输送系统并避免堵塞现象。

### 2.2.2 螺旋输送器叶片力学分析

螺旋输送器旋转时，螺旋叶片会对物料产生一个沿轴向的推力，促使物料向前移动。物料与螺旋叶片、物料与料槽内壁之间会产生摩擦力。当螺旋输送器产生的轴向推力大于轴向摩擦力时，物料才能顺利沿着输送器的轴向方向进行输送。为提高粉碎棉秆输送的顺畅性，对螺旋输送器进行棉秆在螺旋叶片作用下的轴向受力分析，如图 9 所示。

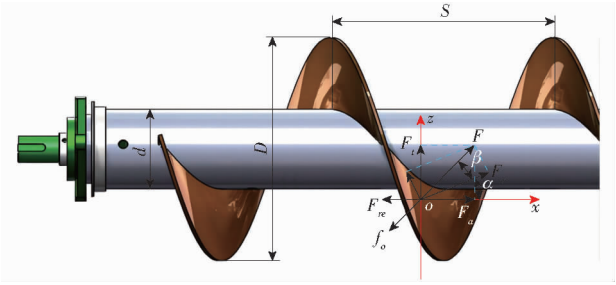



图 9 棉秆在螺旋叶片作用下的受力分析

Fig. 9 Force analysis of cotton stalk under action of spiral blade

由图 9 可知，螺旋叶片与棉秆之间存在摩擦力 $F_f$ 和法向力 $F_r$，推动力 $F_\alpha$ 是将物料推出的主要作用力，轴向力是沿着螺旋轴方向的力，决定了物料的推进方向，若 $F_\alpha > F_{re}$ 棉秆将会向前移动。对螺旋叶片进行力学分析得

$$\begin{cases} A_S = L_1' D_L \\ \alpha = \arctan\left(\dfrac{S}{\pi D_L}\right) \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases} F = \dfrac{F_r}{\cos\beta'} \\ F_r = \rho A_S g \\ F_t = F_r \mu\cos\alpha \\ F_a = F_r\sin\alpha \\ F_f = \mu F_r \\ f_o = \dfrac{60 g\mu Q L_1(1 - K_f)}{3.6 S n} \end{cases} \tag{13}$$

式中 $A_S$——棉秆杂质与螺旋叶片接触的面积，m$^2$

$L_1'$——螺旋叶片长度，mm

$\alpha$——螺旋升角　　$F_t$——切向力，N

$\mu$——棉秆与螺旋叶片之间的摩擦因数

$\beta'$——接触棉秆与螺旋叶片摩擦角，(°)

$K_f$——棉秆与螺旋叶片的摩擦因数与筒壁摩擦因数之比

$f_o$——棉秆与筒壁的摩擦阻力，N

根据机构整体结构尺寸，取螺旋叶片长度为 2 204 mm，螺旋外径、螺距同 2.2.1 节，计算得杂质与叶片的接触面积为 0.926 $m^2$，螺旋升角为 16.07°，棉秆与螺旋叶片摩擦角取 18.8°，棉秆与螺旋叶片的摩擦因数与筒壁摩擦因数之比取 0.5。

比较轴向动力 $F_a$ 和轴向阻力 $F_{re}$（棉秆受到的反向阻力），棉秆发生轴向运动的条件是轴向动力大于轴向阻力，即满足

$$\begin{cases} F_{re} = F_f \sin\alpha + f_o \cos(\alpha + \beta') \\ F_a > F_{re} \end{cases} \tag{14}$$

根据公式(13)和公式(14)计算得 $F_a$ = 330.52 N，$F_{re}$ = 315.27 N，满足 $F_a > F_{re}$，粉碎过后的棉秆将沿着螺旋叶片方向移动，输送至外侧。

## 2.3　传动系统设计

棉秆粉碎还田装置与残膜回收装置均由变速箱分配，整机由拖拉机牵引作业，棉秆粉碎还田装置工作时，由拖拉机后传动轴提供动力，将动力输入至减速箱，减速箱将动力分配至左右两侧，左侧动力输出轴上安装带轮，通过带传动的方式将动力传递给棉秆粉碎装置，实现粉碎作业，右侧输出轴上分别按照有链轮和带轮，通过链传动的方式将动力输出至后方的残膜回收机，通过带传动的方式将动力传递给运输装置，实现粉碎秸秆的侧抛。最终通过左右两侧动力轴实现棉秆粉碎还田作业。如图 10 所示。

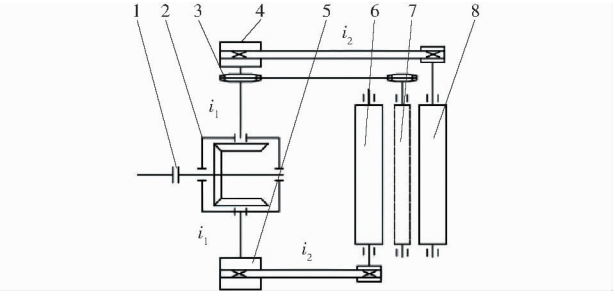



图 10　动力传递线路图

Fig. 10　Driveline diagram

1. 传动轴　2. 变速箱　3. 右侧链传动　4. 右侧带传动　5. 左侧带传动　6. 粉碎装置　7. 残膜回收机动力轴　8. 螺旋输送器

拖拉机输出轴转速为 540、720、1 100 r/min，考虑机具作业条件和对转速要求，确定输出轴为 540 r/min，右侧动力经过变速箱和传动带 2 次变速，使粉碎装置达到 2 100 r/min，右侧总传动比为 $i$ = 2 100/540 = 3.8，左侧动力经过变速箱和传动带使粉碎装置达到 110 r/min，左侧总传动比为 $i$ = 110/540 = 0.2。综合考虑带传动的尺寸、润滑条件等，确定右侧 $i_1$ = 2、$i_2$ = 1.9，左侧 $i_1$ = 0.5、$i_2$ = 0.4。

## 2.4　仿真试验

本文基于 EDEM－RecurDyn 的联合仿真模拟棉秆粉碎抛送过程，分析棉秆粉碎还田装置结构参数与作业参数对抛送轨迹的影响，以优化甩刀数量与作业参数并降低膜面杂质。

### 2.4.1　EDEM 离散元棉秆仿真建模

采用动力学仿真软件 RecurDyn 对秸秆从棉秆粉碎还田装置破碎抛出后至落入螺旋输送器的整个过程进行模拟，建立与真实秸秆特性一致的柔性体棉花秸秆模型。在 EDEM 仿真软件中，秸秆采用 Hertz－Mindlin with bonding 接触模型，该模型可以模拟秸秆的破坏、断裂等力学特性[23]。利用 EDEM 仿真软件中的基本球形颗粒构建茎秆仿真模型，构建茎秆模型时将茎秆近似为圆柱体，为了平衡计算精度和效率，粒子半径设置为 1.5 mm。根据棉秆直径变化，建立 4 种棉秆模型，将棉秆简化为由 9、7、5、3 个基本球形颗粒围绕而成的圆柱体，如图 11 所示。

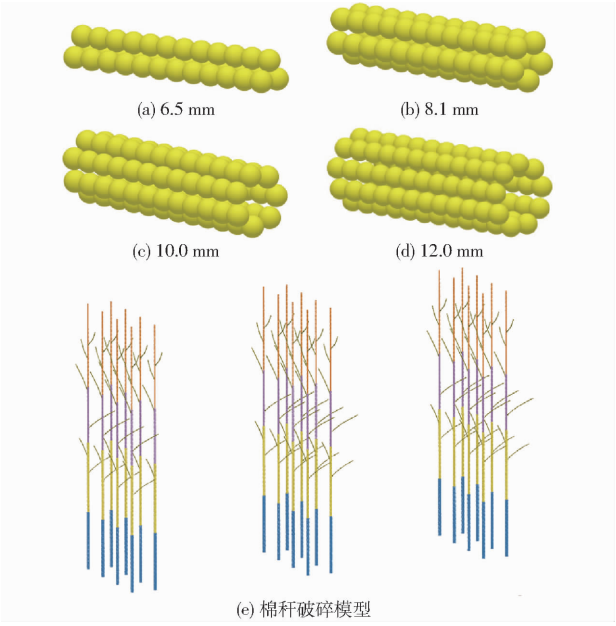



图 11　棉秆离散元模型

Fig. 11　Discrete element models of cotton stalks

根据已有研究结果[24－25]设置粉碎还田装置和秸秆参数：粉碎还田装置材料为 65Mn 钢，泊松比为 0.3、密度为 7 900 kg/$m^3$，剪切模量为 7.94×$10^{10}$ Pa；棉秆泊松比为 0.4，密度为 970 kg/$m^3$，剪切模量为 1.09×$10^9$ Pa，单位面积法向刚度为 9.72×$10^9$ N/$m^3$，单位面积切向刚度为 9.38×$10^9$ N/$m^3$，临界法向应力为 8.43×$10^7$ Pa，临界切向应力为 7×$10^7$ Pa，黏结键半径为 2 mm。接触模型参数如表 2 所示。

**表 2　接触模型参数**

**Tab. 2　Contact parameters of discrete element model**

| 接触模型 | 恢复系数 | 静摩擦因数 | 滚动摩擦因数 |
|---|---|---|---|
| 棉秆–棉秆 | 0.4 | 0.3 | 0.275 |
| 棉秆–65Mn 钢 | 0.4 | 0.6 | 0.275 |

### 2.4.2 棉秆粉碎还田过程仿真试验

棉秆粉碎还田装置 Y 型甩刀数量、Y 型甩刀刀轴转速以及整机前进速度是影响棉秆粉碎效果和地膜表面杂质含量的主要参数，故以甩刀数量、刀轴转速和前进速度为试验因素，以棉秆粉碎效果和地膜表面杂质含量为试验指标。应用 EDEM 后处理模块，在仿真区域下方创建 4 m×2.2 m(长×宽)长方形统计区域[26]，如图 12 所示，统计掉落在承接区域内的棉秆颗粒数量，进而计算棉秆粉碎掉落率，掉落率越小，棉秆粉碎效果越好，地膜表面杂质含量越低。

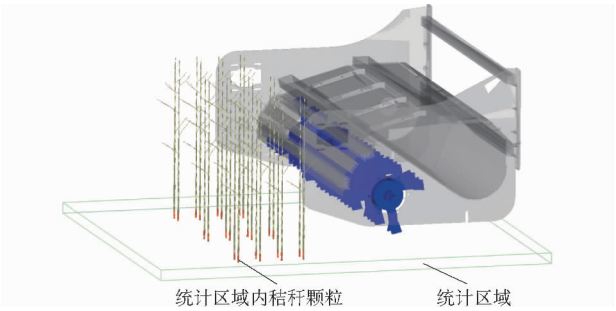



图 12 掉落棉秆颗粒仿真

Fig. 12 Dropping cotton stalk particle simulation

根据粉碎还田装置实际尺寸和工况，甩刀数量取 28、32、36，刀轴转速取 1 900、2 100、2 300 r/min，整机前进速度取 1.0、1.5、2.0 m/s，棉秆粉碎还田试验过程如图 13 所示。

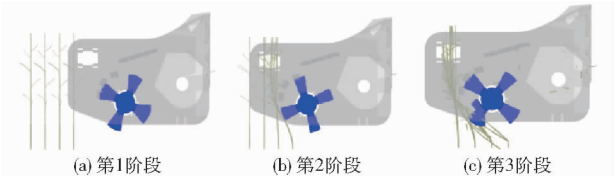



图 13 棉秆粉碎还田过程仿真

Fig. 13 Simulation of cotton stalk crushing and returning process

### 2.4.3 仿真试验结果与分析

#### 2.4.3.1 碎棉秆轨迹追踪

在 EDEM 中选取部分棉秆颗粒进行标记，如图 14 所示，将其运动轨迹进行可视化处理[26]。大部分棉秆经甩刀与定刀的粉碎后被抛送到螺旋输送器内部，碰撞部位集中在定刀处，少部分棉秆粉碎后掉落至地面形成膜面杂质。

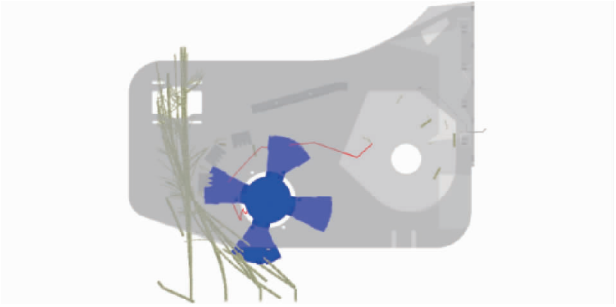


图 14 棉秆粉碎颗粒轨迹示意图

Fig. 14 Schematic of straw crushing particle trajectory

#### 2.4.3.2 甩刀数量对棉秆掉落率的影响

甩刀数量对棉秆粉碎掉落率的影响如图 15 所示，不同甩刀数量下的掉落率随时间变化趋势相似，掉落率达到最大值时都在 0.8～1.0 s。Y 型甩刀的数量直接影响棉秆的粉碎和抛送效果，呈双螺旋排列的 Y 型甩刀数量为 28 片时，甩刀数量偏少、排布间距过大，导致粉碎覆盖不全，部分棉秆未被粉碎，如图 16a 所示；32 片时棉秆粉碎掉落率处于较低的水准，约 2.5%，继续增加甩刀数量，棉秆粉碎掉落率有所降低，变化约 1.3%，说明甩刀数量为 32 片时，已经具备较好的棉秆抛送能力，继续增加甩刀数量对提升棉秆抛送能力意义不大，在控制刀轴转速为 2 100 r/min，前进速度为 1.5 m/s 的仿真条件下，甩刀数量为 28、32、36 片时棉秆粉碎合格率分别为 90.19%、93.05%、91.01%，综合考虑后，确定 Y 型甩刀数量为 32 片。

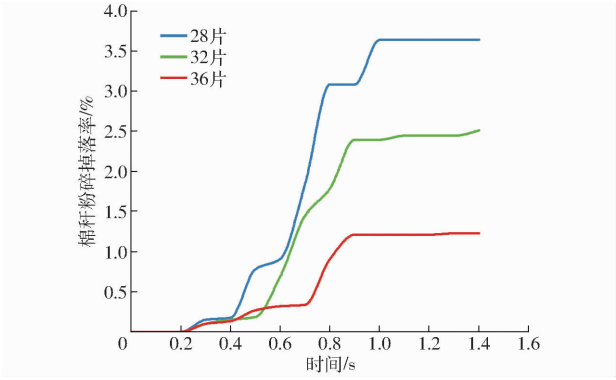



图 15 不同甩刀数量时棉秆粉碎掉落率的变化曲线

Fig. 15 Change curves of cotton stalk crushing drop rate with different number of flails

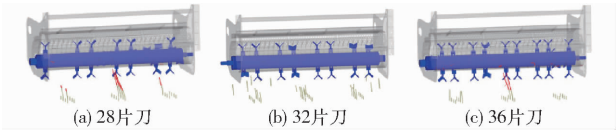



图 16 不同甩刀数量的棉秆破碎仿真结果

Fig. 16 Simulation results of cotton stalk fragmentation with different shredder blade counts

#### 2.4.3.3 刀轴转速对棉秆掉落率的影响

根据前文理论计算，考虑实际工作中的各种影响和摩擦损耗，设置刀轴转速为 1 900、2 100、2 300 r/min。图 17 所示为棉秆粉碎掉落率随刀轴转速变化的规律，不同刀轴转速下棉秆粉碎掉落率差异明显。不同刀轴转速时棉秆破碎仿真结果如图 18 所示，刀轴转速为 1 900 r/min 时存在较多未破碎的完整棉秆；虽然刀轴转速在 2 300 r/min 时相较2 100 r/min 的掉落率低，但未破碎棉秆更多。在

控制甩刀数量为 32 片，前进速度为 1.5 m/s 的仿真条件下，刀轴转速为 1 900、2 100、2 300 r/min 时棉秆粉碎合格率分别为 90.97%、93.05%、91.75%。在田间复杂作业条件下，考虑到棉秆含水率对粉碎效果的影响和对粉碎长度的合格率，刀轴转速设定为 2 100 r/min，在机具前进速度保持恒定的条件下，提高刀轴转速实质上缩短了棉秆的粉碎节距，从而有效降低了超长棉秆的发生率，提升了粉碎均匀性与作业质量。

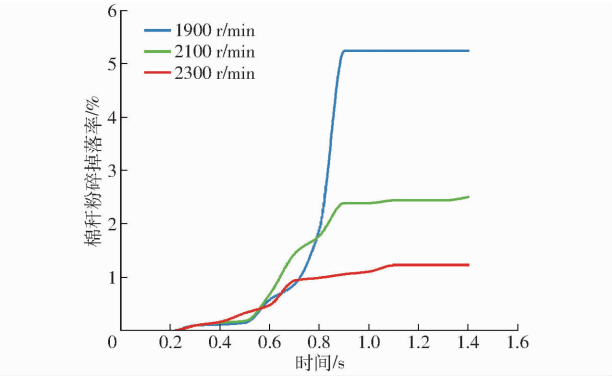



图 17　不同刀轴转速时棉秆粉碎掉落率变化曲线

Fig. 17　Change curves of cotton stalk crushing drop rate at different cutter shaft speeds

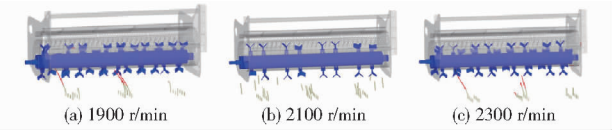



图 18　不同刀轴转速时棉秆破碎仿真结果

Fig. 18　Simulation results of cotton stalk crushing at different cutter shaft speeds

#### 2.4.3.4　整机速度对棉秆掉落率的影响

机具行进速度对棉秆粉碎掉落率的影响如图 19 所示，行进速度对棉秆粉碎掉落率影响较为均匀，机具行进速度从 1 m/s 逐渐上升到 2 m/s 时，棉秆粉碎掉落率与机具行进速度成反比，且 1.5 m/s 与 2 m/s 的掉落率相差不大。由图 20 可知，不同前进速度下棉秆留茬效果相差不大。但在保持粉碎刀轴转速不变的条件下，行进速度增大，变相增大了茎秆粉碎的节距，会出现棉秆超长现象，导致棉秆粉碎合格率下降，在控制甩刀数量为 32 片，刀轴转速为 2 100 r/min 的仿真条件下，前进速度为 1.0、1.5、2.0 m/s 时棉秆粉碎合格率分别为 92.87%、93.05%、90.34%，综合上述分析将棉秆粉碎还田机具行进速度设置为 1.5 m/s。

#### 2.4.3.5　棉秆粉碎仿真结果分析

棉秆粉碎仿真统计区域范围内存在棉秆超长现象。在保持粉碎刀轴转速不变的情况下，行进速度增大，在仿真模拟中棉秆超长现象也相应增加，会导致棉秆粉碎合格率下降。综合上述分析当螺旋甩刀个数为 32，刀轴转速为 2 100 r/min，前进速度为 1.5 m/s 时，仿真结果显示棉秆粉碎还田装置的棉秆粉碎合格率为 93.05%，粉碎掉落率为 2.5%，为机具最优作业参数。

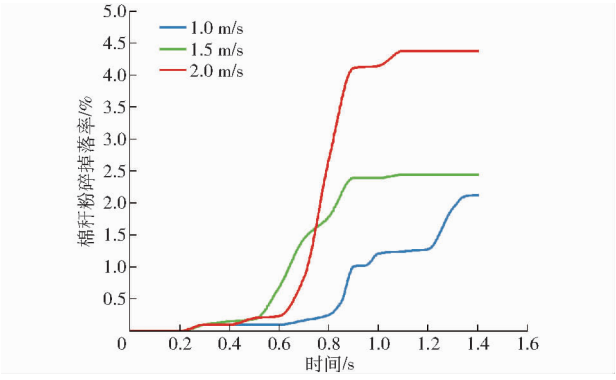



图 19　不同机具前进速度时棉秆粉碎掉落率变化曲线

Fig. 19　Change curves of cotton stalk crushing drop rate at different machine forward speeds

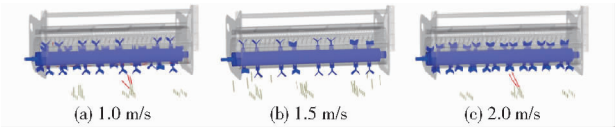



图 20　不同整机速度时棉秆破碎仿真结果

Fig. 20　Simulation results of cotton stalk crushing at different machine speeds

### 2.5　粉碎刀轴模态分析

#### 2.5.1　粉碎刀轴模型的建立及网格划分

作业过程中机械共振对设备稳定运行有极大影响，为保障机具稳定运行需要避免共振产生，通过 ANSYS 中模态分析确定粉碎刀轴的模态属性与转动产生的激励频率。

使用 Solidworks 软件建立粉碎刀轴的三维实体模型，为明确主要模态信息，忽略对模态影响不大的螺纹孔、圆角等细节，并将甩刀与刀轴在装配体环境中进行虚拟装配，并设置两者为刚性连接。将模型导入 ANSYS－Workbench 有限元分析软件中，材料属性设定为 Q235。由于属于模态分析，不需添加外载荷，采用 Automatic（自动网格划分）进行网格划分，将粉碎刀轴整体按照 5 mm 网格大小进行网格划分，其余的按照默认属性，经过划分后共得到 81 714 个节点和 33 153 个网格。

#### 2.5.2　粉碎刀轴模态分析结果

模态分析用于明确系统的振动特性，具体表现为结构的固有频率与振型参数。考虑到低阶振动对结构动态响应的影响更为显著，一般选取 5～10 阶模态参数即可满足分析需求。本文选前 6 阶固有频率及振型展开分析，其中固有频率和总体变形量见表 3。

表 3 粉碎刀轴各阶固有频率

Tab. 3 Natural frequencies of each order of grinding cutter shaft

| 模态阶数 | 固有频率/Hz | 总体变形量/mm |
|---|---|---|
| 1 | 73.541 | 30.958 |
| 2 | 74.306 | 1.796 9 |
| 3 | 177.39 | 1.798 5 |
| 4 | 222.95 | 5.045 4 |
| 5 | 225.72 | 2.419 0 |
| 6 | 350.14 | 2.438 9 |

通过表 3 可以看出,前 6 阶的模态频率都在 400 Hz 以内,最小频率为 73.541 Hz,最高频率为 350.14 Hz,最大变形为 1 阶振型,总体变形量为 30.958 mm。振型如图 21 所示。从图 21 可知,在第 1 阶模态振型中,甩刀出现较大变形,在第 2、3 阶模态振型中,刀轴弯曲变形较大,且中间变形最大,两端减小;第 4 阶模态振型中,刀轴整体做轴向振动;第 5、6 阶模态振型中,轴端处变形位移最大中间逐渐减小。综合表 3 和图 21 可以看出,粉碎刀辊第 1 阶和第 2 阶、第 5 阶和第 6 阶的固有频率相近,第 1 阶和第 2 阶、第 5 阶和第 6 阶的振型也相似,只是振型方向各异。

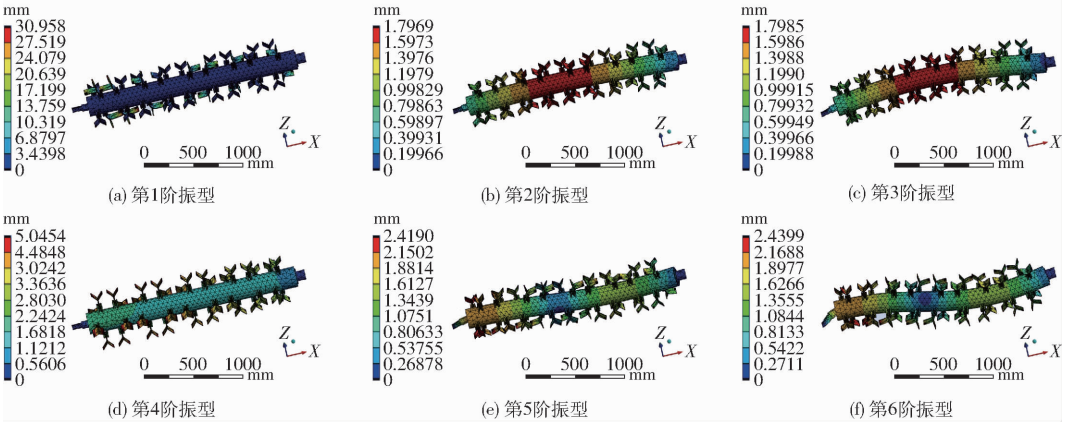



图 21 粉碎刀轴各阶振型图

Fig. 21 Vibration mode diagrams of each order of grinding cutter shaft

由于粉碎刀轴设计工作转速为 1 900 ~ 2 300 r/min,换算成工作频率为 31.67 ~ 38.33 Hz,远低于粉碎刀轴最低阶数的固有频率 73.541 Hz,当机具在工作时粉碎刀轴不会产生共振,不会产生变形,共振特性满足工作要求。

## 3 田间试验

### 3.1 试验条件

为验证设计的 Y 型刀齿式棉秆粉碎还田装置的作业性能、最优工作参数,将其安装至残膜回收机上,如图 22 所示。于 2025 年 10 月在新疆维吾尔自治区阿拉尔市六团进行田间试验,试验田总面积 2.67 $hm^2$,地块为采棉机机械化回收地块,秸秆大部分保持直立,秸秆未粉碎残膜回收地块,地形平坦,满足试验地选择标准,试验过程作业行长 200 m,宽 2 m,铺设地膜为 0.01 mm,其他试验条件如表 4 所示。



图 22 田间试验

Fig. 22 Field test

表 4 试验条件

Tab. 4 Experimental conditions

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 配套功率/kW | 88.2 ~ 117.6 |
| 种植模式尺寸/mm | 660 + 100 |
| 棉花株高/mm | 720 ~ 1 042 |
| 棉秆主干直径/mm | 7.32 ~ 14.32 |
| 土壤含水率/% | 14.5 ~ 16.8 |
| 土壤紧实度/kPa | 3 860 ~ 4 232 |

### 3.2 试验方法

根据 GB/T 24675.6—2021 标准开展棉秆粉碎还田试验,选取棉秆粉碎合格率、粉碎掉落率和平均留茬高度为检测参数,牵引拖拉机为道依茨法尔 1204 型,以 1.5 m/s 的作业速度、2 100 r/min 的粉碎刀轴转速进行作业,测定 3 个行程,每个行程 100 m。

#### 3.2.1 棉秆粉碎合格率

由于棉秆抛撒口在装备作业左侧,因此沿拖拉机作业的行程方向左侧,每个作业行程随机选取 5 个监测点,每个监测点使用 1 m × 1 m 的铝合金取样框,机具作业完成后将监测点内的破碎棉秆收集,用振动筛清理秸秆混合的地膜、石块、土块后进行称

量。从中选取不合格的棉秆进行称量（大于 200 mm），计算棉秆粉碎合格率

$$Y_1 = \frac{\sum_{i=1}^{5} F_{ni} - F_{ni}}{3} \times 100\% \tag{15}$$

$$F_{ni} = \frac{M_{ai} - M_{bi}}{M_{ai}} \times 100\% \tag{16}$$

其中　$i$——监测点编号

$Y_1$——棉秆粉碎合格率，%

$F_{ni}$——监测点 $i$ 棉秆粉碎合格率

$M_{ai}$——监测点 $i$ 粉碎棉秆总质量，kg

$M_{bi}$——监测点 $i$ 粉碎棉秆不合格总质量，kg

**3.2.2**　棉秆抛撒不均匀度

棉秆抛撒均匀度与棉秆粉碎合格率试验同时进行，点位布置条件与 3.2.1 节相同，铺放 1 m × 1 m 的铝合金取样框，收集该区域内的所有棉秆，除秸秆中混杂的泥土、碎石等杂物，对清理后的秸秆进行称量。最后，根据这些称量数据计算秸秆抛撒的不均匀度，计算式为

$$M_s = \frac{1}{M_c} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (M_{ai} - M_c)^2}{n_i - 1}} \times 100\% \tag{17}$$

其中

$$M_c = \frac{M_{ai}}{n_i} \tag{18}$$

式中　$M_s$——棉秆抛撒不均匀度，%

$M_c$——监测点内各点平均质量，kg

$n_i$——测量点数

**3.2.3**　棉秆留茬高度

为保证测定棉秆留茬高度的准确性，在每个作业行程随机选取 5 个 1 m × 1 m 统计区，统计每个行程棉秆留茬高度，进行平均值计算。最后将 3 个行程的棉秆留茬高度取平均。

### 3.3　试验结果与分析

机具作业试验结果如表 5 所示。

**表 5　试验结果**

**Tab.5　Experimental results**

| 试验指标 | 标准要求 | 试验结果 | 仿真结果 |
|---|---|---|---|
| 棉秆粉碎合格率/% | ≥90 | 94.3 | 93.05 |
| 棉秆抛撒不均匀度/% | ≤25 | 13.8 | |
| 棉秆留茬高度/mm | ≤80 | 75.6 | 70 |

由表 5 可知棉秆粉碎还田作业机经过 3 个行程作业其试验结果均优于标准要求，棉秆粉碎合格率在 94.3%，抛撒不均匀度为 13.8%，留茬高度在 75.6 mm，其中棉秆粉碎合格率与仿真结果 93.05% 相差 1.25 个百分点，棉秆留茬高度与仿真结果绝对偏差为 5.6 mm，相对偏差约 7.47%，契合度均大于 90%，构建的仿真模型能较好地贴合实际作业状态，试验过程中棉秆粉碎效果符合要求，甩刀与定刀没有出现断裂、碰撞的现象，螺旋输送器全程无堵塞、缠绕现象，其输送质量稳定，装置的结构和关键参数优化合理，可以保障机具有良好的作业性能，与现有的秸秆粉碎机比较，优化后的棉秆粉碎抛撒还田机能提高棉秆粉碎合格率，降低棉秆抛撒不均匀度。综上所述，当棉秆粉碎装置在刀辊转速为 2 100 r/min 时，作业效果均满足 GB/T 24675.6—2021 标准要求，Y 型刀齿式棉秆粉碎还田装置的性能优越。

## 4　结论

（1）通过理论分析、仿真试验确定 Y 型刀齿式棉秆粉碎还田装置的关键参数，包括甩刀排列方式、数量以及作业参数，明确 32 组棉秆甩刀在粉碎轴上采用 4 螺旋排布，4 条螺旋线相位差为 90°，相邻两定刀的距离为 100 mm，当螺旋输送器直径为 420 mm，输送角度为 16.07°，螺距为 380 mm 时，棉秆正常粉碎，且粉碎后棉秆将沿着螺旋叶片方向移动，棉秆残茬能够顺利通过输送系统并避免堵塞。

（2）采用 MBD - EDEM 多体动力学-离散元联合耦合仿真，建立了棉秆和机具作业模型，通过对比仿真试验可知甩刀数量 32 片、转速 2 100 r/min、前进速度 1.5 m/s 时能够提高棉秆粉碎合格率，降低粉碎掉落率，作业效果较优。通过有限元分析得粉碎刀轴工作转速为 1 900 ~ 2 300 r/min，工作频率为 31.67 ~ 38.33 Hz，远低于粉碎刀轴最低阶数的固有频率 73.541 Hz，因而不会导致共振。

（3）田间试验验证结果表明，棉秆粉碎装置在刀辊转速为 2 100 r/min，前进速度为 1.5 m/s 时，粉碎合格率为 94.3%。抛撒不均匀度为 13.8%，留茬高度在 75.6 mm，各项指标均优于标准要求值，满足作业要求，且在整个试验过程中，装备运行顺畅，未出现任何堵塞现象。

## 参　考　文　献


[1] WANG P, CHEN X G, WEN H J. Simulation research on cotton stalk cutting and crushing based on ANSYS/LS - DYNA and field experiments[J]. Agriculture, 2023, 13(6): 1268.

[2] 国家统计局. 国家统计局关于 2024 年棉花产量的公告[EB/OL]. (2024 - 12 - 25)[2025 - 12 - 30]. http://www.stats.gov.cn.

[3] 左旭, 毕于运, 王红彦, 等. 中国棉秆资源量估算及其自然适宜性评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(6):

159 – 166.
ZUO Xu, BI Yuyun, WANG Hongyan, et al. Estimation and suitability evaluation of cotton stalk resources in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(6): 159 – 166. (in Chinese)
[4] 丁凯泽, 么铮铮, 吐尔洪·努尔, 等. 棉花秸秆的应用研究进展[J]. 棉花学报, 2024, 36(3): 237 – 254.
DING Kaize, YAO Zhengzheng, TUERHONG Nuer, et al. Research progress in the application of cotton straw[J]. Cotton Science, 2024, 36(3): 237 – 254. (in Chinese)
[5] 白志刚, 刘帅, 胡启星, 等. 棉花秸秆利用的主要途径及存在的问题[J]. 棉花科学,2021,43(5):11 – 15.
BAI Zhigang, LIU Shuai, HU Qixing, et al. Main ways and problems of cotton straw utilization[J]. Cotton Sciences, 2021, 43(5): 11 – 15. (in Chinese)
[6] 秦猛, 董全中, 薛红, 等. 我国保护性耕作的研究进展[J]. 河南农业科学, 2023, 52(7): 1 – 11.
QIN Meng, DONG Quanzhong, XUE Hong, et al. Research progress of conservation tillage in China[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(7): 1 – 11. (in Chinese)
[7] 朱倩倩, 冉彤彤, 许咏梅, 等. 棉花秸秆利用现状及其还田技术[J]. 农业科技通讯, 2022(4): 39 – 41, 45.
ZHU Qianqian, RAN Tongtong, XU Yongmei, et al. Current status of cotton straw utilization and its return-to-field technology[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2022(4): 39 – 41, 45. (in Chinese)
[8] 颜利民, 吴涛, 蒋德莉, 等. 侧抛式棉秆粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 216 – 226.
YAN Limin, WU Tao, JIANG Deli, et al. Design and experiment of side-throwing cotton stalk crushing and returning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 216 – 226. (in Chinese)
[9] 由佳翰, 陈学庚, 张本华, 等. 4JSM – 2000 型棉秆粉碎与残膜回收联合作业机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 10 – 16.
YOU Jiahan, CHEN Xuegeng, ZHANG Benhua, et al. Design and experiment of 4JSM – 2000 type combined operation machinefor cotton stalk chopping and residual plastic film collecting[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 10 – 16. (in Chinese)
[10] 卢登明, 陆亮阳, 张颖, 等. 4CMJ – 2.0 型秸秆还田及残膜回收一体机研制与应用[J]. 农业机械, 2023 (1): 85 – 87.
[11] 谢建华, 洪佳, 曹肆林, 等. 棉秆粉碎及地膜随动集条机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 1 – 11.
XIE Jianhua, HONG Jia, CAO Silin, et al. Design and experiment of cotton stalk chopping and plastic filmmaster-slave strip collector[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(9): 1 – 11. (in Chinese)
[12] 王学农, 冯斌, 陈发, 等. 4JSM – 1800 棉秸秆还田及残膜回收联合作业机研制[J]. 新疆农机化, 2003(4): 53 – 54.
[13] 李亚萍, 蒙贺伟, 贾健, 等. 4JH – 220 型秸秆粉碎还田机的研制[J]. 农机化研究, 2015, 37(7): 143 – 146.
LI Yaping, MENG Hewei, JIA Jian, et al. Development of 4JH – 220 shattering and returning machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(7): 143 – 146. (in Chinese)
[14] 贺小伟, 刘金秀, 徐杨, 等. 4MB – 6 型密植棉秆对行铲拔铺放机改进设计[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 21 – 30.
HE Xiaowei, LIU Jinxiu, XU Yang, et al. Improvement design of 4MB – 6 row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks in close planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 21 – 30. (in Chinese)
[15] 郑巨云, 龚照龙, 梁亚军, 等. 新疆机采棉花生产关键技术模式[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(增刊 1): 70 – 74.
ZHENG Juyun, GONG Zhaolong, LIANG Yajun, et al. Key technology model of machine-picked cotton production in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(Supp.1): 70 – 74. (in Chinese)
[16] 蒋从军, 阿里甫·艾尔西, 林涛, 等. 脱叶剂对机采棉不同种植模式脱叶效果、产量及品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(11): 2661 – 2666.
JIANG Congjun, ALIFU Aierxi, LIN Tao, et al. Effects of defoliants on defoliation, yield and quality of machine-picked cotton in different planting modes[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(11): 2661 – 2666. (in Chinese)
[17] 廖培旺, 于家川, 邵蓉蓉, 等. 棉秆拔秆粉碎一体收获台设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(6): 33 – 39.
LIAO Peiwang, YU Jiachuan, SHAO Rongrong, et al. Design and test of cotton stalk pulling and crushing integrated harvesting platform[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(6): 33 – 39. (in Chinese)
[18] 韩绪明, 张姬, 高彦超, 等. 锯盘式秸秆粉碎还田机的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(12): 7 – 11, 73.
HAN Xuming, ZHANG Ji, GAO Yanchao, et al. Design and test of saw disc straw crushing returning machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(12): 7 – 11, 73. (in Chinese)
[19] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社,2007.
[20] 陈松涛, 周学建, 师清翔, 等. 小麦秸秆还田机粉碎装置性能影响因素试验与优化[J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 67 – 70, 62.
CHEN Songtao, ZHOU Xuejian, SHI Qingxiang, et al. Experiment and optimization on factors affecting the performance of wheat stalk macerator smashing devices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(9): 67 – 70, 62. (in Chinese)

(下转第 193 页)

Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(11): 95 - 99. (in Chinese)
[15] 胡飞,郭栋,陈彩蓉,等.复合曲柄摇杆式蔬菜膜上双行栽植装置设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(9):62 - 69.
HU Fei, GUO Dong, CHEN Cairong, et al. Design and experiment of a double-row planting device for vegetables on film with a compound crank-rocker mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 62 - 69. (in Chinese)
[16] 喻丽华,徐志波,韩忠禄,等.丘陵山区辣椒机械化移栽适应性分析[J].农机化研究,2020,42(10):184 - 188,194.
YU Lihua, XU Zhibo, HAN Zhonglu, et al. Adaptability analysis of mechanized transplanting of chili peppers in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(10): 184 - 188,194. (in Chinese)
[17] 刘冲.往复式鸭嘴栽植装置的设计与试验[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院,2023.
LIU Chong. Design and experiment of a reciprocating duckbill planting device[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2023. (in Chinese)
[18] 朱兴亮,郭彦克,韩长杰,等.茄果类钵苗自动移栽机设计与试验[J].中国农机化学报,2021,42(5):19 - 26.
ZHU Xingliang, GUO Yanke, HAN Changjie, et al. Design and experiment of an automatic transplanter for solanaceous vegetable seedlings[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(5): 19 - 26. (in Chinese)
[19] 徐高伟.大垄膜上交错双行丹参移栽机关键部件研究及整机设计[D]. 哈尔滨: 东北农业大学,2019.
XU Gaowei. Research on key components and integrated design of double-row staggered salvia miltiorrhiza transplanter for large ridge with plastic film mulching[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[20] 张诺一.高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构优化设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2020.
ZHANG Nuoyi. Optimization design and experiment of high-speed duckbill planting mechanism with variable posture seedling feeding[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020. (in Chinese)
[21] 姬江涛,杨林辉,金鑫,等.行星轮系滑道式钵苗栽植机构设计与参数优化[J].农业工程学报,2018,34(18):83 - 92.
JI Jiangtao, YANG Linhui, JIN Xin, et al. Design and parameter optimization of planetary gear train with slideway type pot-seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 83 - 92. (in Chinese)
[22] 尹文庆,刘海马,胡飞,等.旱地栽植机八连杆栽植机构优化设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(10):51 - 60.
YIN Wenqing, LIU Haima, HU Fei, et al. Optimization design and experiment of eight-bar planting mechanism for dryland transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 51 - 60. (in Chinese)

(上接第 132 页)

[21] 张佳喜, 王学农, 陈发, 等. 秸秆粉碎还田回收机刀辊工作参数的研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 82 - 85, 37.
ZHANG Jiaxi, WANG Xuenong, CHEN Fa, et al. Study on working parameters of knife roller of field straw chopper for mulching or reclaiming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 82 - 85, 37. (in Chinese)
[22] 史建新, 陈发, 郭俊先, 等. 抛送式棉秆粉碎还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 68 - 72.
SHI Jianxin, CHEN Fa, GUO Junxian, et al. Design and experimental research of the field straw chopper with throwing cotton-stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 68 - 72. (in Chinese)
[23] 谢伟, 彭磊, 蒋葭, 等. 收获期油菜薹茎秆双层粘结离散元模型建立与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 112 - 120.
XIE Wei, PENG Lei, JIANG Pin, et al. Discrete element model building and optimization of double-layer bonding of rape shoots stems at harvest stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 112 - 120. (in Chinese)
[24] ZHAO W S, CHEN M J, XIE J H, et al. Discrete element modeling and physical experiment research on the biomechanical properties of cotton stalk[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107502.
[25] 张佳喜, 张彭, 张虎, 等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 76 - 84, 108.
ZHANG Jiaxi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 76 - 84, 108. (in Chinese)
[26] 黄伟. 离心式贝类播苗设备设计与试验研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2022.
HUANG Wei. Design and experimental study of centrifugal shellfish seeding device[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2022. (in Chinese)