doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.024

动态滑切分段式驱动圆盘防堵装置设计与试验

毕津硕[1,2]　卢彩云[1,2]　李洪文[1,2]　翟成堃[1,2]　王志楠[1,2]　高世杰[1,2]
(1.中国农业大学工学院,北京 100083;2.农业农村部保护性耕作农业装备重点实验室,北京 100083)

摘要:针对东北玉米一熟区免耕播种时切断式防堵装置难以兼顾切断效果和作业功率的问题,本文设计了一种可实现稳定动态滑切的分段式驱动圆盘防堵装置,在保证切断效果的同时有效降低作业功率。采用对数螺旋线作为圆盘刀刃基础曲线,通过静态滑切角分析、动静态滑切角转换,设计了刀刃分段曲线结构,确定了玉米秸秆切割最优动态滑切角为 37.5°。基于离散元法建立“圆盘-土壤-秸秆”互作模型,对照试验结果表明,分段式驱动圆盘可保证切断效果同时降低作业功率;在此基础上,以切割功率和切断效果为指标,通过二次回归旋转正交试验对圆盘关键参数进行优化,得到分段式驱动圆盘最优作业参数为:转速 310 r/min、前进速度 2 m/s、外圆半径 225 mm。根据最优作业参数完成样机试制,并开展田间试验。田间试验结果表明,在秸秆整秆还田条件下,最优作业参数下秸秆切断率为 97.85%,破茬率为 91.53%,机具通过性好。与缺口圆盘和平面圆盘相比,分段式驱动圆盘作业功率分别降低 23.69% 和 11.69%,满足东北地区玉米免耕播种作业要求。

关键词:防堵装置;滑切;圆盘;离散元法;保护性耕作
中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0291-10　　**OSID**:

Design and Testing of Dynamic Sliding Cutting Segmented Drive Disc Anti-blocking Device

BI Jinshuo[1,2]　LU Caiyun[1,2]　LI Hongwen[1,2]　ZHAI Chengkun[1,2]　WANG Zhinan[1,2]　GAO Shijie[1,2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment for Conservation Tillage*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming to address the issue that cutting-type anti-blocking devices struggle to balance cutting efficiency and operation power during no-tillage seeding in the single-cropping corn region of Northeast China, a segmented driving disc anti-blocking device capable of stable dynamic sliding cutting was designed, which effectively reduced operation power while ensuring cutting performance. The logarithmic spiral was adopted as the base curve of the disc blade. Through static sliding cutting angle analysis and dynamic-static sliding cutting angle conversion, a segmented blade curve structure was designed, and the optimal dynamic sliding cutting angle for corn stalk cutting was determined to be 37.5°. A “disc - soil - stalk” interaction model was established based on the discrete element method (DEM). Comparative test results showed that the segmented driving disc could ensure cutting efficiency while reducing operation power. On this basis, with cutting power and cutting efficiency as indicators, the key parameters of the disc were optimized through quadratic regression rotation orthogonal tests. The optimal operation parameters of the segmented driving disc were obtained as follows: rotational speed was 310 r/min, forward speed was 2 m/s, and outer radius was 225 mm. A prototype was trial-manufactured according to the optimal operation parameters, and field tests were conducted. The field test results indicated that under the condition of full stalk return, the stalk cutting rate and stubble breaking rate under the optimal operation parameters were 97.85% and 91.53%, respectively. Compared with notched discs and flat discs, the operation power of the segmented driving disc was reduced by 23.69% and 11.69%, respectively, meeting the requirements of corn no-tillage seeding operations in Northeast China.

Key words: anti-blocking device; sliding cutting; disc; discrete element method; conservation tillage

收稿日期:2024-06-27　修回日期:2024-07-18
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1500401)和中国农业大学 2115 人才工程项目
作者简介:毕津硕(2001—),男,硕士生,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail:bijinshuo@cau.edu.cn
通信作者:李洪文(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail:lhwen@cau.edu.cn

0 引言

免耕播种机是保护性耕作的关键机具,为提高机具作业通过性,防止秸秆和根茬影响播种质量,通常需在播种机开沟器前方安装防堵装置,目前常用的防堵装置分为切断式和分开式[1-5]。在我国东北地区开展保护性耕作时,为降低土壤侵蚀,在秸秆还田时通常需进行留茬作业,对于留茬作业后的秸秆覆盖地,分开式防堵装置难以对秸秆和根茬同时进行有效处理,而切断式防堵装置无法满足高速作业需求。

国内外学者基于这一现状对切断式防堵装置进行了大量研究[6-11]。当前主要的切断式防堵装置分为驱动式和被动式。被动式切断装置作业功率较低,但在高速作业或秸秆覆盖量大时切割效果差、防堵效果不理想;驱动式防堵装置具有较好的切断效果,但作业功率过大[12-15]。

在秸秆及根茬切割过程中,滑切角是影响切割功率的重要因素,选取适当的滑切角可保证较好切断效果的同时降低作业功率[16-20];部分学者基于静态滑切理论进行了秸秆切割装置设计[11,21-22],但在防堵装置动态切割过程中,受前进速度影响,动态滑切角往往处于较大的波动范围,难以有效降低作业功率。

针对上述问题,本文设计一种可实现稳定动态滑切分段式驱动圆盘防堵装置。基于对数螺旋线进行分段式驱动圆盘设计,确定玉米秸秆切割最优动态滑切角。建立离散元互作模型,以验证分段式驱动圆盘可行性,并通过二次回归旋转正交试验确定圆盘最优作业参数;通过田间试验验证分段式驱动圆盘作业性能,以期为切断式防堵装置设计提供理论支撑。

1 整体结构与工作原理

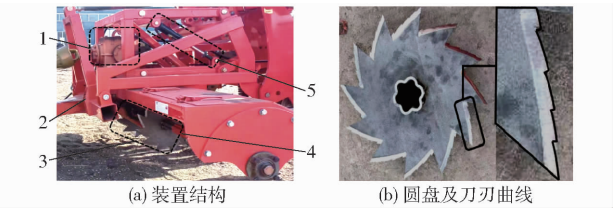
1.1 整体结构

如图 1a 所示,分段式驱动圆盘防堵装置安装在玉米免耕播种机前方,由变速箱、机架、液压升降机构、驱动轴以及分段式驱动圆盘组成。驱动轴和分段式驱动圆盘是其关键部件,圆盘与套筒焊接后,安装在驱动轴上实现定位。

如图 1b 所示,分段式驱动圆盘缺口数为 12。为保证作业过程中分段式驱动圆盘动态滑切角稳定在最优滑切角区间,每个缺口处刀刃曲线由多段不同参数的分曲线组成。

1.2 工作原理

分段式驱动圆盘防堵装置通过液压升降机构调节入土深度,其动力由拖拉机后输出轴经变速箱传递给驱动轴,带动圆盘旋转作业。作业时高速旋转的分段式驱动圆盘不断切换与秸秆接触的刀刃曲线,在维持稳定动态滑切角的同时切断种行上的玉米秸秆和根茬,为后续开沟器等部件顺利通过提供良好的环境,达到驱动防堵的效果。为降低土壤扰动和作业功率,圆盘倾角和偏角均取 0°。



(a) 装置结构 (b) 圆盘及刀刃曲线

图 1 分段式驱动圆盘防堵装置结构

Fig. 1 Structural diagrams of drive type anti-blocking device

1. 变速箱 2. 机架 3. 分段式驱动圆盘 4. 驱动轴 5. 液压升降机构

图 2 为大垄双行玉米保护性耕作种植模式[23],垄上种植两行玉米,玉米宽行行距 l_l 为 80 cm,窄行行距 l_s 为 50 cm。因此,分段式驱动圆盘间距设为 50 cm。

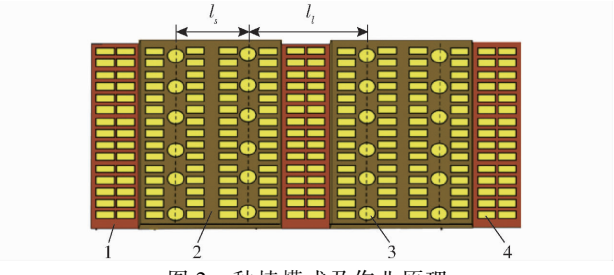


图 2 种植模式及作业原理

Fig. 2 Planting mode and operating principle

1. 垄沟 2. 垄 3. 种行根茬 4. 秸秆

2 分段式驱动圆盘设计

2.1 圆盘刀刃曲线与静态滑切角

2.1.1 圆盘刀刃曲线选取

滑切角是影响切割功率的重要因素,在圆盘作业过程中,维持滑切角处于较优区间可有效降低作业功率。图 3 为对数螺旋线,其特点是曲线上任意点 A,原点 O 与点 A 的连线在点 A 处的垂线 l_1 与该点法线 l_3 的夹角 τ 为固定值[11]。当曲线绕原点回转并与物体接触时,曲线在点 A 处的回转速度方向为垂线 l_1 方向,对物体正应力方向为法线 l_3 方向,二者形成的夹角即为曲线对物体作用的滑切角。由对数螺旋线特点可知,该曲线静态滑切角始终为 τ。因此,选取对数螺旋线为刀刃基础曲线。

该曲线可由极坐标方程表示为

$$\alpha = \frac{\pi}{180}\tan\left(\frac{180}{\pi}\tau\right)\ln r + c \tag{1}$$

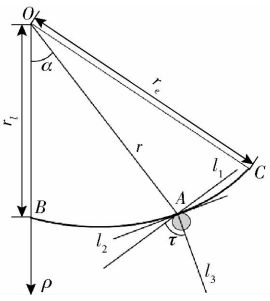


图 3　对数螺旋线极坐标特征图

Fig. 3　Logarithmic spiral polar coordinate feature map

式中　c——待定参数，(°)

α——接触点与垂直方向夹角，(°)

r——曲线上任意点回转半径，mm

由图 3 可看出，当接触点 A 由位置 B 移动至位置 C 时，虽其滑切角 τ 固定不变，但其回转半径 r 不断增大，由内圆半径 r_l 增加到外圆半径 r_e。

2.1.2　静态滑切角确定

分段式驱动圆盘作业时，其运动速度由自身旋转和机具前进 2 部分组成。在不考虑前进速度前提下，分析其旋转运动产生的静态滑切角 τ，为后续前进速度作用下动态滑切角分析提供基础。

为获取静态滑切角，建立秸秆被圆盘刀刃曲线切割的力学模型，如图 4 所示。为保证秸秆被圆盘完全切断，秸秆在被切割阶段应处于静止，相对地面不产生移动。即假设秸秆为质点，秸秆所受最大静摩擦力 F_f 应大于其余力在水平方向的合力，由此可得

$$F_f \geqslant F_{f1}\cos(\alpha+\tau-90°) - F_1\sin(\alpha+\tau-90°) \tag{2}$$

其中　$F_{f1} = F_1\tan\mu_1$　　$F_f = F\tan\mu_2$

式中　μ_1——圆盘和秸秆摩擦角，(°)

μ_2——秸秆和地面摩擦角，(°)

F——地面对秸秆的支持力，N

F_{f1}——圆盘对秸秆的摩擦力，N

F_1——圆盘对秸秆的正压力，N

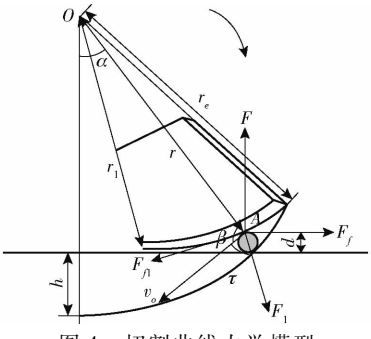


图 4　切割曲线力学模型

Fig. 4　Cutting curve mechanical model

秸秆纵向受力为

$$F = F_1\cos(\alpha+\tau-90°) + F_{f1}\sin(\alpha+\tau-90°) \tag{3}$$

由式(3)可得圆盘对秸秆的正应力 F_1 为

$$F_1 = \frac{F}{\cos(\alpha+\tau-90°) + \tan\mu_1\sin(\alpha+\tau-90°)} \tag{4}$$

将式(4)代入式(2)可得

$$\frac{\tan\mu_1\cos(\alpha+\tau-90°) - \sin(\alpha+\tau-90°)}{\cos(\alpha+\tau-90°) + \tan\mu_1\sin(\alpha+\tau-90°)} \leqslant \tan\mu_2 \tag{5}$$

由 $\alpha = \arccos\dfrac{r_e-h-d}{r}$ 及进一步三角函数变换得到

$$\tau \geqslant \mu_1 - \arccos\frac{r_e-h-d}{r} - \mu_2 + 90° \tag{6}$$

式中　h——圆盘入土深度，mm

d——秸秆直径，mm

由式(6)可知，影响静态滑切角 τ 的因素有入土深度 h、秸秆直径 d、秸秆与地面摩擦角 μ_2、秸秆与圆盘摩擦角 μ_1、外圆半径 r_e 及接触点回转半径 r。

圆盘需有一定的入土深度，才能完整切断秸秆及根茬，即入土深度大于根茬深度。查阅文献[24]，土壤阻力方程为

$$F_2 = \rho_d g h^2 N_{\rho_d} + C_h N_c C_\alpha N_{ca} \tag{7}$$

式中　F_2——土壤阻力，N

g——重力加速度，m/s^2

$N_{\rho d}$、N_c、N_{ca}——土壤阻力系数

C_h——土壤粘聚强度，Pa

C_α——土壤附强度，Pa

ρ_d——土壤容重，kg/m^3

由式(7)可知，入土深度越大，土壤阻力越高，机具作业所需功率越大。因此，在保证完整切断根茬的前提下应尽量减少入土深度 h。采用五点取样法采集秸秆以及根茬，将其标记为 5 组，如表 1 所示，测得平均根茬深度 h_1 为 62.2 mm，因此选择圆盘入土深度 h 为 70.0 mm。秸秆直径取其平均值为 20.0 mm。

表 1　秸秆根茬尺寸参数

Tab. 1　Stalk and stubble parameters　mm

序号	1	2	3	4	5
根茬深度 h_1	57.9	62.0	64.8	63.5	62.9
秸秆直径 d	20.2	20.5	18.4	20.5	20.4

为满足圆盘耐磨性及强度要求，选用 65Mn 钢为圆盘材料，摩擦试验测得 65Mn 和秸秆摩擦角 μ_1 为 20°。

由文献[25]可知秸秆和地面摩擦角为 23° ~ 33°，选取秸秆和地面摩擦角 μ_2 为 30°。

转速相同时，随着外圆半径增大，接触点速度增加，切断效果随之提升；但受限于机架尺寸，圆盘外

圆半径 r_e通常不超过 235 mm,初步选取圆盘外圆半径 r_e为 215 mm。

在入土深度 h、秸秆直径 d、秸秆与地面摩擦角 μ_2、秸秆与圆盘摩擦角 μ_1、外圆半径 r_e等参数确定的前提下,式(6)为 τ 关于接触点半径 r 的不等式。在圆盘回转过程中,接触点半径 r 在内圆半径 r_l和外圆半径 r_e之间变化。

参照文献[24],选取圆盘内圆半径为 150 mm。结合圆盘外圆和内圆半径,计算得对数螺旋线静态滑切角参数 τ 大于 45.76°。

2.2 动静态滑切角转换规律

在田间作业时,圆盘在自身旋转的同时,还存在水平前进速度。在静态滑切角分析基础上,结合圆盘前进速度,通过运动学分析,建立动态滑切角与静态滑切角之间的转换关系,分析同一曲线滑切角波动量随前进速度和转速的变化规律。

动静态滑切角转换关系如图 5 所示,由于受前进速度 v 的影响,刀刃曲线线速度方向由 v_0变为 v_t,接触点滑切角由静态滑切角 τ 转变为动态滑切角 τ_t。相对于静态滑切角 τ,动态滑切角 τ_t会存在不同程度降低。这种降低是引入前进速度 v 导致的,为获得动态滑切角降低量,建立接触点 A 动态滑切角 τ_t表达式为

$$\tau_t=\arctan\frac{v_o\cos\alpha-1\,000v}{v_o\sin\alpha}+\alpha+\tau-90°=\arctan\frac{2\pi n_1(r_e-h-d)-60\,000v}{\sqrt{r^2-(r_e-h-d)^2}2\pi n_1}+\arccos\frac{r_e-h-d}{r}+\tau-90° \tag{8}$$

其中

$$v_o=\frac{2\pi r n_1}{60}$$

式中 v_t——实际切割速度,m/s

n_1——圆盘转速,r/min

由式(8)可以看出,动态滑切角 τ_t主要由静态滑切角 τ 和滑切角降低量 $\Delta\tau$ 组成,假设静态滑切角 τ 一定条件下,其表达式为

$$\Delta\tau=90°-\arctan\frac{2\pi n_1(r_e-h-d)-60\,000v}{\sqrt{r^2-(r_e-h-d)^2}2\pi n_1}-\arccos\frac{r_e-h-d}{r} \tag{9}$$

其中,外圆半径 r_e、入土深度 h、秸秆直径 d 已在前文确定,式(9)为动态滑切角降低量 $\Delta\tau$ 关于回转半径 r、圆盘转速 n_1和前进速度 v 的表达式。

圆盘刀刃曲线对数螺旋线参数确定后,其上任意点回转半径 r 在内圆半径 r_l和外圆半径 r_e之间变化。为探讨刀刃单一曲线上动态滑切角稳定性,明确动态滑切角变化范围,以外圆半径 r_e和内圆半径 r_l处 2 个极值点差值为研究对象,即同一曲线的滑切角波动量为指标,采用 Origin 软件生成其不同转速和前进速度条件下的变化图(图 6)。

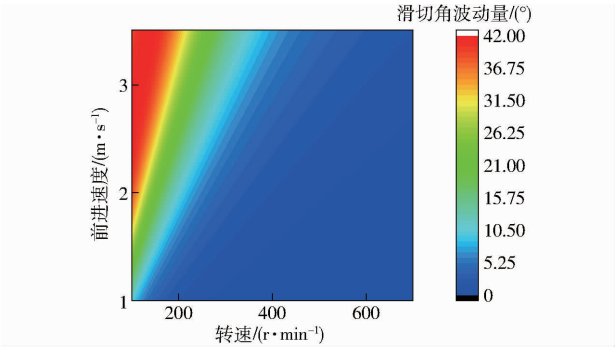


图 6 同一曲线动态滑切角波动量等高线图

Fig. 6 Contour plot of dynamic sliding cutting angle wave momentum on the same curve

由图 6 可知,随着转速增大,同一曲线滑切角波动量不断降低;但随着前进速度增大,同一曲线滑切角波动量不断增加,当机具高速作业时,同一曲线滑切角波动量较大,即动态滑切角 τ_t变化范围较大,难以实现稳定动态滑切。为此,本文提出了一种基于稳定动态滑切的刀刃分段曲线结构。

2.3 稳定动态滑切分段刀刃曲线结构设计

2.3.1 设计方法

稳定动态滑切刀刃分段曲线设计方法如图 7 所示,将圆盘缺口处刀刃曲线按照回转半径 r 由小到大等分为 n 段(图中 $n=5$),任意一段 L_k外圆半径点均为点 C,其回转半径范围等差递减,表达式为

$$r_e-\frac{r_e-r_l}{n}(k-1)\leqslant r\leqslant r_e-\frac{r_e-r_l}{n}k\quad(k=1,2,\cdots,n) \tag{10}$$

通过控制 n,缩小回转半径 r 范围,减小每一分段曲线 L_k的滑切角波动量。通过改变每段分曲线 L_k的静态滑切角 τ_k,降低曲线滑切角波动。每段分曲线 L_k静态滑切角 τ_k由式(10)和式(8)共同计算得到。

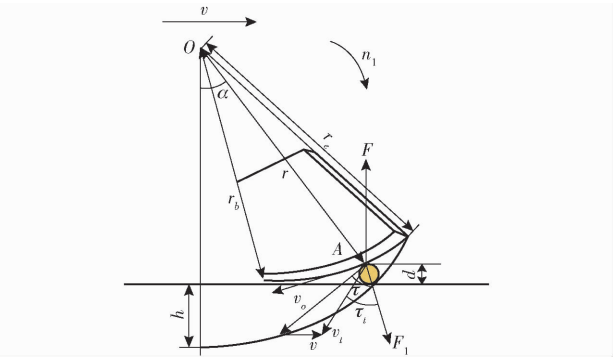


图 5 动静态滑切角转换关系示意图

Fig. 5 Schematic of conversion relationship between dynamic and static sliding cutting angles

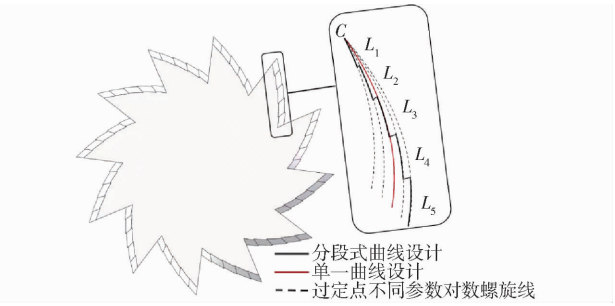


图 7　分段式驱动圆盘结构示意图

Fig. 7　Schematic of segmented sliding cutting disc structure

为对比刀刃分段曲线和单一曲线 2 种刀刃曲线动态滑切角 τ_t 的差异，设置圆盘内圆半径和外圆半径为 150 mm 和 215 mm，转速和前进速度为 2 m/s 和 240 r/min，平均动态滑切角均为 τ_{t1}。2 种刀刃曲线动态滑切角变化规律如图 8 所示。可以看出，刀刃采用单一曲线时，其动态滑切角 τ_t 持续增加，滑切角波动量较大；而采用分段曲线时，动态滑切角 τ_t 变化稳定在 τ_{t1} 的 ±1°范围内。

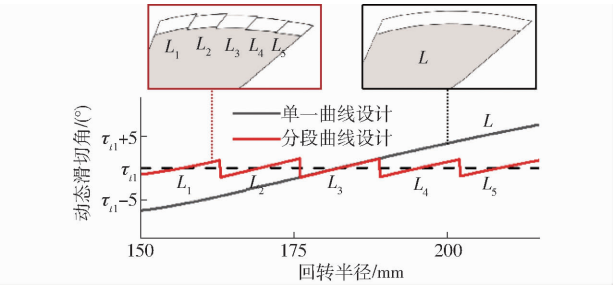


图 8　2 种曲线设计方式动态滑切角对照

Fig. 8　Comparison of dynamic sliding cutting angle of two curve design methods

2.3.2　最优动态滑切角确定

为获取最优动态滑切角，开展玉米秸秆滑切试验。试验所用玉米秸秆取自内蒙古自治区兴安盟乌兰浩特一年一熟玉米种植区，品种为吉单 35 号，采用对角线取样法采集，并截取不同直径的秸秆节段进行试验。秸秆直径为 14、16、18、20、22 mm。采用干燥法测得玉米秸秆含水率为 21.5%。

秸秆滑切试验于 2024 年 1 月 3 日在中国农业大学工学院进行，试验设备如图 9 所示，将不同滑切角刀片安装在万能材料机上进行切割试验，前进速度为 500 mm/min。刀片基本尺寸为厚度 2 mm、长 80 mm、宽 35 mm 和刃口角 45°。滑切角分别为 0°、15°、30°、45°和 60°共 5 个水平，试验重复 5 次。

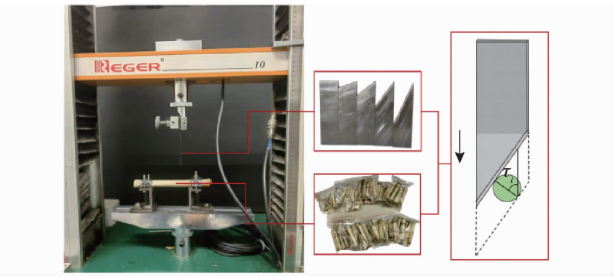


图 9　试验材料与设备

Fig. 9　Test materials and equipment

通过万能材料机力-位移传感器可以获得切割过程中的力-位移曲线，并得到峰值力，对力-位移曲线求积分可以得到切割功耗，试验结果如表 2 所示。

表 2　玉米秸秆切割试验结果

Tab. 2　Maize stalk cutting results

滑切角/(°)	峰值力/N	单位面积切割功耗/(J·cm^{-2})
0	341.35	2.41
15	257.06	1.97
30	125.63	1.12
45	109.49	1.25
60	105.86	1.54

由表 2 可知，随着滑切角增加，切割峰值力下降，同时滑切角对切割峰值力的影响逐渐降低，45°与 60°时峰值力相近；单位面积切割功耗随着滑切角增加先降低后增加，当滑切角为 30°时单位面积切割功耗最低，45°滑切角切割功耗略高于 30°时。以兼具较低的作业功耗和峰值力为目标，选取最优滑切角为 37.5°。

3　离散元仿真试验

通过 EDEM 离散元仿真软件构建“圆盘-玉米秸秆-土壤”互作模型，模拟圆盘在土壤支撑下的秸秆切割过程，以玉米秸秆粘结键断裂数和圆盘切割功率为指标，从微观角度分析分段式驱动圆盘作业性能。

3.1　“圆盘-秸秆-土壤”离散元模型构建

为建立“圆盘-秸秆-土壤”离散元仿真模型，将圆盘导入 EDEM，材质选用 65Mn。参照文献[26-30]，设置圆盘泊松比、密度和剪切模量分别为 0.36、7 830 kg/m^3、7.27 × 10^{10} Pa；秸秆泊松比、密度和剪切模量分别为 0.40、241 kg/m^3、1.00 × 10^6 Pa；土壤泊松比、密度和剪切模量分别为 0.30、2 500 kg/m^3、1.00 × 10^6 Pa。土壤以颗粒床形式生成，土壤颗粒半径为 5 mm，采用 Hysteretic Spring 以及 Linear Cohesion V_2 模型，土壤颗粒屈服强度为 140 074 Pa，能量密度为 9 439.07 J/m^3。秸秆采用 Bonding V_2 模型，秸秆颗粒单位面积法向刚度为 9.3 × 10^8 N/m^3，单位切向刚度为 9.4 × 10^8 N/m^3，法向临界应力为 1 × 10^8 Pa，切向临界应力 1 × 10^8 Pa，秸秆颗粒半径为 1.2 mm，接触半径为 1.44 mm。

秸秆切断效果以粘结键断裂数体现，为方便定量化统计，秸秆定向铺放，铺放距离为 4 cm，秸秆总量为 30 根，秸秆长度为 20 cm，秸秆直径为 20 mm，

秸秆采用颗粒静态生成。土壤、秸秆、圆盘接触参数如表 3 所示。构建的“圆盘-秸秆-土壤”离散元模型如图 10 所示。

表 3 模型参数

Tab. 3 Model parameters

接触模型	恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
秸秆-秸秆	0.4	0.14	0.08
秸秆-土壤	0.5	0.50	0.01
土壤-土壤	0.6	0.33	0.14
圆盘-土壤	0.6	0.31	0.11
圆盘-秸秆	0.5	0.30	0.10

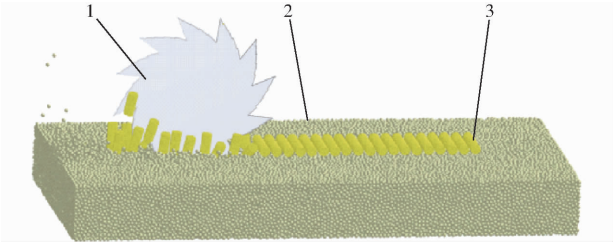


图 10 秸秆-土壤-圆盘互作模型

Fig. 10 Stalk - soil - disc interaction model

1. 分段式驱动圆盘 2. 土壤 3. 玉米秸秆

3.2 对照试验

为验证所设计的分段式驱动圆盘的性能，选取分段式驱动圆盘、缺口圆盘、平面圆盘进行对照试验。圆盘结构如图 11 所示，仿真时采用前文已确定的外圆半径和入土深度等参数，前进速度为 2 m/s，转速为 300 r/min。

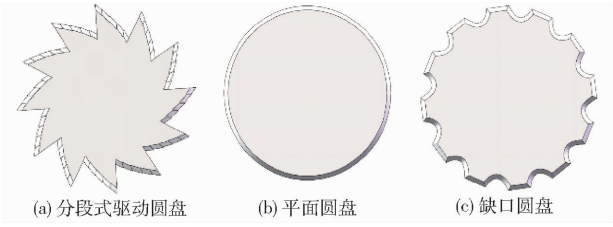


图 11 3 种圆盘结构图

Fig. 11 Structure diagrams of three discs

试验结果如表 4 所示，分段式驱动圆盘作业下的粘结键断裂数最高，缺口圆盘次之，平面圆盘最低。而切割功率的规律相反，分段式驱动圆盘切割功率低于其他 2 种圆盘。与缺口圆盘和平面圆盘相比，设计的分段式驱动圆盘具有更好的切断效果和更低的切割功率。

表 4 对照试验及结果

Tab. 4 Control test results

圆盘类型	粘结键断裂数	切割功率/kW
分段式驱动圆盘	21 098	1.88
缺口圆盘	21 321	2.65
平面圆盘	18 365	2.27

3.3 二次回归正交组合试验

3.3.1 试验设计与结果分析

试验因素编码如表 5 所示，以粘结键断裂数和切割功率为指标。

表 5 试验因素与编码

Tab. 5 Test factors and coding

编码	因素		
	转速/(r·min^{-1})	前进速度/(m·s^{-1})	外圆半径/mm
-1	240	2.0	205
0	360	2.5	215
1	480	3.0	225

试验结果如表 6 所示，使用 Design-Expert 得到粘结键断裂数和切割功率方差分析结果，如表 7 所示，表中 X_1、X_2、X_3为因素编码。

表 6 试验安排与结果

Tab. 6 Test arrangements and results

序号	因素			粘结键断裂数 Y_1	切割功率 Y_2/kW
	X_1	X_2	X_3		
1	1	0	-1	21 126	3.27
2	0	0	0	20 586	2.53
3	0	1	-1	18 540	2.73
4	0	0	0	19 629	2.39
5	0	-1	1	21 712	2.50
6	1	-1	0	23 112	3.45
7	1	1	0	21 356	3.56
8	0	0	0	20 333	2.32
9	0	0	0	19 225	2.52
10	-1	1	0	17 920	2.52
11	0	1	1	20 362	2.70
12	-1	-1	0	19 675	1.59
13	1	0	1	22 840	3.88
14	-1	0	1	19 826	2.00
15	-1	0	-1	18 985	2.22
16	0	-1	-1	19 433	2.00
17	0	0	0	19 628	2.43

由表 7 可知，粘结键断裂数模型极显著，圆盘转速、前进速度、外圆半径对粘结键断裂数影响极显著，二次项转速对粘结键断裂数影响显著；切割功率模型极显著，圆盘转速、前进速度、外圆半径对切割功率影响极显著，交互项圆盘转速与前进速度、圆盘转速与外圆半径、前进速度与外圆半径对切割功率影响都是极显著，二次项转速对切割功率影响极显著。

由表 7 可知，粘结键断裂数和切割功率的失拟项均不显著($P>0.1$)，故回归模型具有较好的可靠性。由此，保留显著项后得到粘结键断裂数 Y_1和切割功率 Y_2回归方程分别为

$$Y_1 = 19\,938.67 + 1\,503.50X_1 - 719.26X_2 + 823.00X_3 + 666.33X_1^2 \quad (11)$$

表 7　方差分析结果

Tab. 7　Analysis result of variance

试验指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
粘结键断裂数	模型	3.00×10^7	9	3.33×10^6	10.96	<0.01 **
	X_1	1.81×10^7	1	1.81×10^7	59.49	<0.01 **
	X_2	4.14×10^6	1	4.14×10^6	13.61	<0.01 **
	X_3	5.54×10^6	1	5.54×10^6	18.22	<0.01 **
	X_1X_2	0.25	1	0.25	<0.01	1.00
	X_1X_3	1.91×10^5	1	1.91×10^5	0.63	0.45
	X_2X_3	5.22×10^4	1	5.22×10^4	0.17	0.69
	X_1^2	1.83×10^6	1	1.83×10^6	6.02	0.04 *
	X_2^2	2.32×10^3	1	2.32×10^3	0.01	0.93
	X_3^2	1.01×10^5	1	1.01×10^5	0.33	0.58
	残差	2.13×10^6	7	3.04×10^5		
	失拟项	8.69×10^5	3	2.90×10^5	0.92	0.51
	总和	3.21×10^7	16			
切割功率	模型	5.76	9	0.64	127.60	<0.01 **
	X_1	4.24	1	4.24	846.15	<0.01 **
	X_2	0.485	1	0.485	96.72	<0.01 **
	X_3	0.09	1	0.09	18.16	<0.01 **
	X_1X_2	0.17	1	0.17	33.27	<0.01 **
	X_1X_3	0.17	1	0.17	34.64	<0.01 **
	X_2X_3	0.07	1	0.07	13.97	<0.01 **
	X_1^2	0.51	1	0.51	100.92	<0.01 **
	X_2^2	<0.01	1	<0.01	0.07	0.81
	X_3^2	0.01	1	0.01	2.49	0.16
	残差	0.03	7	<0.01		
	失拟项	<0.01	3	<0.01	0.09	0.96
	总和	5.79	16			

注：** 表示影响极显著（$P<0.01$）；* 表示影响显著（$0.01\leqslant P<0.05$）。

$$Y_2=2.46+0.728\,3X_1+0.246\,2X_2+0.106\,7X_3-0.204\,2X_1X_2+0.208\,4X_1X_3-0.132\,3X_2X_3+0.349\,2X_1^2 \tag{12}$$

3.3.2　响应面分析

转速、前进速度和外圆半径 3 种因素对切割功率的交互响应曲面，如图 12 所示。

由图 12a 可知，在前进速度较低时，随着转速增加，切割功率增加；而随着前进速度增大，转速对切割功率的影响降低。这是由于前进速度较低时，转速增加使秸秆被重复切割次数增加，此时切割功率增加量较大；当前进速度提高后，秸秆重复切割次数降低，转速对切割功率影响降低。

由图 12b 可知，在外圆半径较小时，随着转速提高，切割功率增加；而随着外圆半径的增加，转速对切割功率的影响提高。这是由于外圆半径较小时，随着转速提高，切割速度提高，切割功率增加；随着外圆半径增加，圆盘切割点平均半径增加，切割速度进一步提高，对切割功率影响更加显著。

由图 12c 可知，前进速度较低时，随着外圆半径的增大，切割功率显著提高；随着前进速度提高，外圆半径对切割功率的影响降低。这是由于前进速度处于较低水平时，秸秆被切割频率高，重复切割概率大，外圆半径增加使圆盘切割曲线长度增加，重复切割秸秆时完全切断概率提高，从而切割功率增加；前进速度提高后，圆盘对秸秆多为单次切割，重复切割概率降低，外圆半径对切割功率的影响也随之降低。

3.3.3　回归优化与试验验证

为了获得圆盘最优作业参数，利用 Design-Expert 对粘结键断裂数 Y_1 模型和切割功率 Y_2 模型进行优化求解。为保证切断效果的同时具有较低切割功率，目标函数为

$$\begin{cases}17\,920\leqslant\max Y_1(X_1,X_2,X_3)\leqslant23\,112\\1.59\ \text{kW}\leqslant\min Y_2(X_1,X_2,X_3)\leqslant3.88\ \text{kW}\\\text{s.t.}\begin{cases}-1\leqslant X_1\leqslant1\\-1\leqslant X_2\leqslant1\\-1\leqslant X_3\leqslant1\end{cases}\end{cases} \tag{13}$$

优化求解得到最优组合参数为：分段式驱动圆盘转速 310 r/min、机具前进速度为 2 m/s、外圆半径为 225 mm，此时粘结键断裂数为 21 176，切割功率为 2.04 kW。依此参数进行验证，得到粘结键断裂数为 20 817，误差为 1.7%；切割功率为 1.99 kW，误

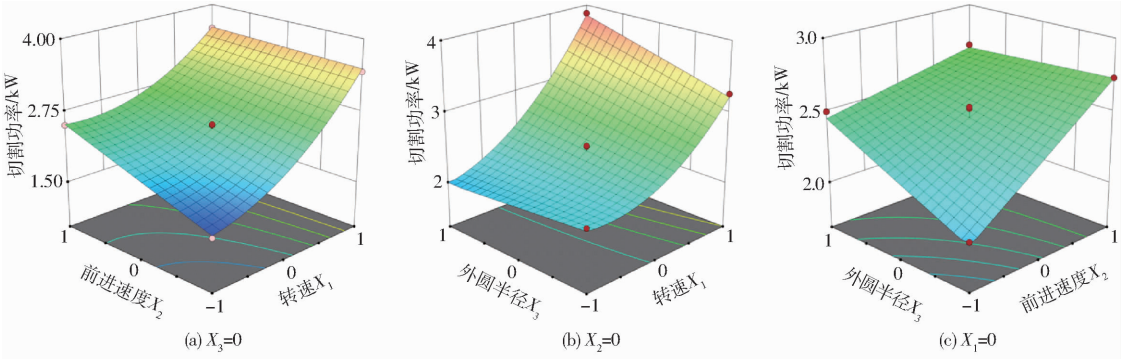


图 12　各因素交互效应响应曲面

Fig. 12　Response surfaces of interaction effects of various factors

差为 2.3%。试验值与预测值具有较高的一致性，该回归模型具有较高的准确性。此时圆盘刀刃分段曲线 L_1、L_2、L_3、L_4、L_5 静态滑切角依次为 53.1°、52.0°、50.8°、49.3°、47.5°，待定参数为 -6.28°、-6.00°、-5.71°、-5.37°、-4.98°。

4 田间试验

4.1 试验条件与设备

为验证分段式驱动圆盘在田间作业时对玉米秸秆、根茬的切割性能和作业功率，于 2024 年 4—6 月在内蒙古自治区兴安盟乌兰浩特市中国农业大学保护性耕作试验田进行，前茬作物为玉米。试验田长 240 m、宽 30 m，土壤 0 ~ 10 cm 含水率为 15.6%，土壤坚实度为 849 kPa。玉米收获后秸秆全量整秆还田，秸秆平均长度为 83.5 cm，平均留茬高度为 18.3 cm，秸秆覆盖率为 95.6%，试验条件如图 13 所示。



图 13 试验条件

Fig. 13 Test condition

根据仿真获得的最优组合参数加工分段式驱动圆盘装置，与两行播种机连接，由拖拉机动力输出轴提供动力，拖拉机液压控制系统改变入土深度，如图 14 所示。拖拉机有 720、540 r/min 两挡转速，通过变速箱减速后，圆盘理论转速为 310、230 r/min，在实际作业过程中考虑拖拉机动力输出轴转速波动，定义圆盘理论转速 310 r/min 为高转速，230 r/min 为低转速。



图 14 试验设备

Fig. 14 Test equipment

4.2 机具通过性与秸秆切断率

4.2.1 试验方法

以机具前进速度和圆盘转速为影响因素，机具通过性和秸秆切断率为指标开展试验，验证分段式驱动圆盘装置的可行性。设置机具前进速度 v 分别为 1、2、3 m/s；圆盘转速为 310、230 r/min，共 6 种处理。每种处理试验时，机具在长度 240 m 地块上进行一次往返作业。

(1)秸秆切断率

机具往返作业后，随机选取 9 个长度为 10 m 的测量区域，测量区域宽度为 30 cm。秸秆切断率计算式为

$$P_q = \frac{N_D}{N_T} \times 100\% \tag{14}$$

式中 P_q——秸秆切断率，%

N_D——测量区域内被切断的秸秆数

N_T——测量区内秸秆总数

测量区域中的秸秆，两端存在至少一处未氧化的切断面时被判定为切断；若两侧均为氧化后淡黄色的切断面则判定为未切断；未完全切断处判定为未切断。

播种机一行用于测试机具通过性，另一行用于测试秸秆覆盖率。为避免分段式驱动圆盘未切断秸秆被开沟器切割或已切断的秸秆被开沟器重复切割，影响秸秆切割率，将播种机上测试秸秆切断率一行的开沟器拆除。

(2)机具通过性

播种机在作业长度 60 m 内发生一次需人工不停机处理的堵塞或因堵塞出现不大于 1.5 m 的连续晾籽和断条时，视为轻度堵塞；若需停机人工清理的堵塞或出现不少于 2 次人工不停机处理的堵塞或因堵塞出现大于 1.5 m 的连续晾籽和断条时，视为重度堵塞。

4.2.2 结果与分析

试验结果如表 8 所示，在不同作业参数下，秸秆切断率均大于 90%，整体切断效果好。机具前进速度为 2 m/s，圆盘高速旋转时的秸秆切断率最高，为 97.85%，与仿真结果一致，即最优组合参数下的秸秆切断率最高。

表 8 秸秆切断率和通过性

Tab. 8 Straw cutting rate and passability

前进速度/(m·s⁻¹)	转速/(r·min⁻¹)	切断秸秆数量	秸秆总量	秸秆切断率/%	轻度堵塞次数
1	310	328	340	96.47	1
1	230	315	330	95.45	1
2	310	318	325	97.85	0
2	230	308	316	97.46	1
3	310	306	318	96.23	1
3	230	289	309	93.53	2

当前进速度为 3 m/s、转速为 230 r/min 时，往返行程 240 m 内轻度堵塞次数最高，为 2 次，但其并非在 60 m 内产生；同时，由于试验过程中未产生需人工停机处理的堵塞，故在所有试验条件下，分段式驱动圆盘装置均未发生重度堵塞。其中，最优参数组合下，机具通过性最优，未发生堵塞现象。

由表 8 可知，机具前进速度相同时，随着转速提高，秸秆切断量增加，秸秆切断率提高。转速相同条件下，机具前进速度为 1、2 m/s 时的秸秆切断率无显著差异（$P>0.05$），均具有较好的秸秆切断效果。机具前进速度 2 m/s 条件下的圆盘切断率略高于 1 m/s 时，这是因为机具前进速度为 2 m/s 时，刀刃曲线平均动态滑切角稳定在最优的 37.5°，而机具前进速度为 1 m/s 时，由于前进速度变化，导致平均动态滑切角无法维持在最优水平，在一定程度上影响了秸秆切割效果。当速度增加至 3 m/s 时，由图 6 可知，同一曲线滑切角波动量变大，动态滑切角稳定性下降，降低了圆盘切割性能。

4.3　破茬率

破茬率是检验留茬作业后防堵装置作业性能的重要指标[4]。对最优参数组合下的分段式驱动圆盘防堵装置进行破茬率测定。机具作业后，选择 9 个长度为 10 m 的测量区域，将完全切断的根茬以红色旗帜进行标记，未完全切断的根茬以蓝色旗帜进行标记，如图 15 所示。破茬率计算公式为

$$P_P=\frac{N_P}{N_A}\times 100\% \tag{15}$$

式中　P_P——破茬率，%

N_P——切断根茬数量

N_A——根茬总量

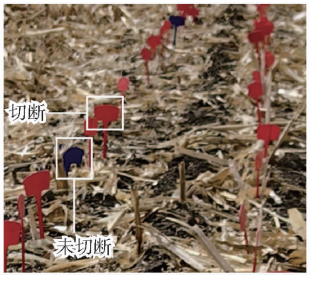


图 15　破茬率测定

Fig. 15　Determination of stubble breaking rate

统计 9 组样本数据后，得到分段式驱动圆盘防堵装置平均破茬率为 91.53%，表明该装置具有可靠的破茬性能。

4.4　作业功率

为明确分段式驱动圆盘防堵装置在降低作业功率方面的作用，选取分段式驱动圆盘、平面圆盘和缺口圆盘进行对照试验。当作业速度为 2 m/s、圆盘转速为 310 r/min、作业长度为 10 m 时，进行 3 次重复试验。JN－DN 型动态扭矩转速传感器采集动力输出轴功率初始数据，并通过信息采集模块将数据传递给 MCK－DN 型动扭测控仪。传感器安装如图 16a 所示，试验圆盘如图 16b 所示。



(a) 传感器安装　(b) 试验圆盘

图 16　传感器安装和试验圆盘

Fig. 16　Sensor installation and three types of discs

试验可得分段式驱动圆盘作业功率为 2.19 kW，缺口圆盘作业功率为 2.87 kW，平面圆盘作业功率为 2.48 kW。分段式驱动圆盘作业功率分别比缺口圆盘和平面圆盘低 23.69% 和 11.69%。

5　结论

（1）设计了一种可实现稳定动态滑切的分段式驱动圆盘装置；采用对数螺旋线为圆盘刀刃的基础曲线，通过静态滑切角分析、动静态滑切角的转换，设计了刀刃分段曲线结构，确定了最优动态滑切角为 37.5°。

（2）建立“秸秆-土壤-圆盘”离散元互作模型，对照试验验证了分段式驱动圆盘在切断效果和降低作业功率方面的优势；通过二次回归正交试验建立了粘结键断裂数和切割功率的回归模型，确定了分段式驱动圆盘最优参数为前进速度 2 m/s、转速 310 r/min、外圆半径 225 mm。

（3）田间试验结果表明，机具通过性好，最优组合参数下，分段式驱动圆盘防堵装置秸秆切断率为 97.85%，破茬率为 91.53%，作业功率比缺口圆盘和平面圆盘低 23.69% 和 11.69%。

参　考　文　献

[1]　高焕文，李问盈，李洪文. 中国特色保护性耕作技术[J]. 农业工程学报，2003，19(3)：1－4.
GAO Huanwen, LI Wenying, LI Hongwen. Conservation tillage technology with Chinese characteristrics[J]. Transactions of the

CSAE, 2003, 19(3): 1 - 4. (in Chinese)
[2] 敖曼,张旭东,关义新. 东北黑土保护性耕作技术的研究与实践[J]. 中国科学院院刊,2021,36(10):1203 - 1215.
AO Man, ZHANG Xudong, GUAN Yixin. Research and practice of conservation tillage in black soil region of northeast China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1203 - 1215. (in Chinese)
[3] 廖庆喜,高焕文,舒彩霞. 免耕播种机防堵技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报,2004, 20(1):108 - 112.
LIAO Qingxi, GAO Huanwen, SHU Caixia. Present situations and prospects of anti-blocking technology of no-tillage planter [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 108 - 112. (in Chinese)
[4] ZHENG Z, CHEN Y. Performance evaluation of fluted coulters and rippled discs for vertical tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 183: 93 - 99.
[5] 李宝筏,杨文革,王勇,等. 东北地区保护性耕作研究进展与建议[J]. 农机化研究,2004,26(1):9 - 13.
LI Baofa, YANG Wen'ge, WANG Yong, et al. The research development and suggestions about conservation tillage in northeast area of China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Resarch, 2004,26(1): 9 - 13. (in Chinese)
[6] 刘俊孝,王浩,王庆杰,等. 玉米少免耕播种机种带灭茬清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):132 - 140.
LIU Junxiao, WANG Hao, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of strip cleaning device of no and minimum-tillage corn seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 132 - 140. (in Chinese)
[7] 曹鑫鹏,王庆杰,李洪文,等. 玉米免耕播种机侧置切刀与拨茬齿盘组合清茬装置研究[J]. 农业机械学报,2021,52(3): 36 - 44.
CAO Xinpeng, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Combined row cleaners research with side cutter and stubble clean disk of corn no-till seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3) :36 - 44. (in Chinese)
[8] 王奇. 行间清秸耕整关键技术及条带耕整机研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
WANG Qi. Research on key technologies of inter-row clean-tillage and its strip-till machine[J]. Changchun : Jilin University, 2019. (in Chinese)
[9] 林静,吕洲翼,李宏哲,等. 垄作免耕播种机被动式防缠绕破茬清垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(6): 19 - 27,37.
LIN Jing, LÜ Zhouyi, LI Hongzhe, et al. Design and experiment of passive anti-winding stubble breaking and ridge cleaning device for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6):19 - 27,37. (in Chinese)
[10] 林静,李博,李宝筏,等. 阿基米德螺线型缺口圆盘破茬刀参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(6):118 - 124.
LIN Jing, LI Bo, LI Baofa, et al. Design and experiment of Archimedes spiral type stubble breaking ditching device and stubble breaking anti blocking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 118 - 124. (in Chinese)
[11] 贾洪雷,赵佳乐,姜鑫铭,等. 行间免耕播种机防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(18):16 - 25.
JIA Honglei, ZHAO Jiale, JIANG Xinming, et al. Design and experiment of anti-blocking mechanism for inter-row no-tillage seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 16 - 25. (in Chinese)
[12] FIAZ A, DIND W, DING Q, et al. Forces and straw cutting performance of double disc furrow opener in no-till paddy soil [J]. PLoS One, 2015, 10(3): e0119648.
[13] MALASI M Z, CELIK A. Disc angle and tilt angle effects on forces acting on a single-disc type no-till seeder opener[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 194: 104304.
[14] YUAN P, LI H, HUANG S, et al. Parameter optimization and experiment of a seed furrow cleaning device for no-till maize seeding[J]. Agriculture, 2022,12(11):1901.
[15] 段益平,吴明亮,吕江南,等. 免耕播种防堵技术研究现状及发展建议[J]. 中国农业科技导报,2022,24(2):124 - 135.
DUAN Yiping, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Research status and development suggestions of no-tillage seeding anti-blocking technology[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(2): 124 - 135. (in Chinese)
[16] 寻怀义. 滑切理论探讨[J]. 农业机械学报,1979,10(4):107 - 111.
[17] 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选用[J]. 华中农学院学报,1982(2):64 - 69.
PANG Shenghai. On the theory of sliding cutting and the choice of its angle[J]. Journal of Huazhong Agricultural College, 1982(2):64 - 69. (in Chinese)
[18] O'DOGHERTY M J, GALE G E. Laboratory studies of the effect of blade parameters and stalk configuration on the dynamics of cutting grass[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1991, 49: 99 - 111.
[19] PRASAD J, GUPTA C P. Mechanical properties of maize stalk as related to harvesting[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1975, 20(1): 79 - 87.
[20] ZHANG C, CHEN L, XIA J, et al. Effects of blade sliding cutting angle and stalk level on cutting energy of rice stalks[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(6): 75 - 81.
[21] 郑智旗,何进,李洪文,等. 动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):108 - 116.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 108 - 116. (in Chinese)

(下转第 374 页)

YANG Huimin, SAN Yunlong, CHEN Yifei, et al. Influence of different vibration characteristic parameters on vibration response of apricot trees[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2): 10 - 16. (in Chinese)

[23] WEI Juan, YANG Guangyuan, YAN Hao, et al. Rigid-flexible coupling simulation and experimental vibration analysis of pistachio tree for optimal mechanized harvesting efficiency[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2020, 28(22): 2360 - 2369.

[24] 贺磊盈. 面向振动采收的果树枝干三维重建方法及其动力学特性研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2014.
HE Leiying. Researches on 3D reconstruction of fruit tree's trunk and its dynamic characteristics for vibratory harvesting[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014. (in Chinese)

[25] MORAVČÍK L, VINCÚR R, RÓZOVÁ Z. Analysis of the static behavior of a single tree on a finite element model[J]. Plants, 2021, 10: 1284.

[26] 王芳东. 红壤地区油茶和水稻叶绿素、全氮含量高光谱特征研究[D]. 南昌:江西农业大学,2023.
WANG Fangdong. Hyperspectral characterization of chlorophyll and total nitrogen content of oil tea and rice in red soil area [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University,2023. (in Chinese)

[27] 赵凯杰. 油茶果采摘机构——果树刚柔耦合动力学特性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
ZHAO Kaijie. Study on rigid-flexible coupling dynamic characteristics of camellia fruit picking mechanism[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020. (in Chinese)

(上接第 300 页)

[22] 郭茜. 藤茎类秸秆切割机理与性能试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2016.
GUO Qian. Experimental research on the cutting mechanism and performance of rattan straw[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)

[23] 王庆杰,李洪文,徐迪娟,等. 大垄双行玉米免耕播种技术研究[J]. 干旱地区农业研究,2007(2):17 - 20.
WANG Qingjie, LI Hongwen, XU Dijuan, et al. Study on the technology of the corn no-till planting of one big ridge two rows [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007(2): 17 - 20. (in Chinese)

[24] 朱惠斌,钱诚,白丽珍,等. 正反转动力式玉米切茬防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(1):1 - 11.
ZHU Huibin, QIAN Cheng, BAI Lizhen, et al. Design and experiments of active anti-blocking device with forward-reverse rotation[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(1): 1 - 11. (in Chinese)

[25] 王庆杰,李洪文,何进,等. 螺旋刀型垄台清理装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2010,26(6):109 - 113.
WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment on twist type ridge-clear device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 109 - 113. (in Chinese)

[26] 雷廷宙,沈胜强,吴创之,等. 玉米秸秆干燥特性的试验研究[J]. 太阳能学报,2005,26(2):224 - 227.
LEI Tingzhou, SHEN Shengqiang, WU Chuangzhi, et al. Experimental research on drying characteristics of maize straw[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2005, 26(2): 224 - 227. (in Chinese)

[27] 刘禹辰,张锋伟,宋学锋,等. 基于离散元法玉米秸秆双层粘结模型力学特性研究[J]. 东北农业大学学报,2022,53(1):45 - 54.
LIU Yuchen, ZHANG Fengwei, SONG Xuefeng, et al. Study on mechanical properties for corn straw of double-layer bonding model based on discrete element method[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(1): 45 - 54. (in Chinese)

[28] 王超,刘从京,李洪文,等. 非对称式大小圆盘开沟装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(18):28 - 36.
WANG Chao, LIU Congjing, LI Hongwen, et al. Design and experiment of asymmetric large-small double discs ditching device [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 28 - 36. (in Chinese)

[29] 高振,卢彩云,位旭阳,等. 协拨组合式玉米条带秸秆清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(10):68 - 79.
GAO Zhen, LU Caiyun, WEI Xuyang, et al. Design and experiment of co-stirring combined corn strip the straw cleaning device with coordinated combination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 68 - 79. (in Chinese)

[30] LIU L, WANG X, ZHANG X, et al. Determination and verification of parameters for discrete element modelling of single disc covering of flexible straw with soil[J]. Biosystems Engineering, 2023, 233: 151 - 167.