doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.02.001

麦茬地免耕播种机切秸破茬种床整理装置设计与试验

张银平[1,2]　徐　婷[1]　侯献伟[3]　周　华[1]　孙昀璟[3]　贾立淼[1]

（1.山东理工大学农业工程与食品科学学院，淄博 255049；2.上海交通大学动力与机械工程学院，上海 200240；
3.山东省农业机械技术推广站，济南 250013）

摘要：针对黄淮海两熟区麦茬地留茬高、根茬难破碎，玉米免耕播种机种床整理部件易缠绕、拥堵，导致种床不平、播种质量差等问题，本文基于“根茬切割破碎移位”思路设计了切秸破茬种床整理装置，采用同轴上下分布的动定刀组合式根秸切割装置和根茬破碎移位装置，实现地上高留茬根秸切断和根茬破碎移除。基于滑切原理，以对数螺旋线和阿基米德螺旋曲线设计根秸切割动、定刀和根茬破碎移位刀刃口曲线，并通过动力学分析确定根秸切割动、定刀和根茬破碎移位刀结构参数。选取机具前进速度、根茬破碎移位刀入土深度、装置转速为试验因素，以种带清秸率和种带宽变异系数为试验指标设计三因素三水平正交旋转组合试验，建立各因素与指标的回归模型和响应面数学模型。田间试验结果表明，最优参数组合为机具前进速度 9 km/h、根茬破碎移位刀入土深度 70 mm、装置转速 515 r/min，此时种带清秸率为 92.59%，种带宽变异系数为 7.77%，机具通过性合格，满足黄淮海两熟区玉米免耕播种机作业要求。研究结果为玉米免耕播种机种床整理装置设计与优化提供参考。

关键词：免耕播种；种床整理装置；动定刀组合式根秸切割装置；根茬破碎移位刀；滑切

中图分类号：S23　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)02-0001-11　　**OSID**：

Design and Experiment of Straw Cutting, Stubble Breaking and Seed Bed Preparation Device for No-till Seeders in Wheat Stubble Fields

ZHANG Yinping[1,2]　XU Ting[1]　HOU Xianwei[3]　ZHOU Hua[1]　SUN Yunjing[3]　JIA Limiao[1]

(1. *College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo* 255049, *China*
2. *School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai* 200240, *China*
3. *Shandong Provincial Agricultural Machinery Technology Extension Station, Ji'nan* 250013, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of high stubble residue in the Huang-Huai-Hai double-cropping area, the stubble-residue is difficult to break in the process of no-tillage sowing of maize, which leads to the winding and congestion of the bed preparation device, thus dragging and pushing soil, resulting in uneven sowing bed and poor sowing quality. Based on the idea of "root stubble cutting, crushing and shifting", a straw cutting, stubble breaking and seed bed preparation device was designed. The coaxial upper and lower distributed moving and fixed knife combined root stubble cutting device and the root stubble crushing and shifting device were adopted to achieve the cutting of high stubble left above ground and the crushing and removal of root stubble in wheat. Based on the sliding cutting principle, the blade curves of the dynamic and fixed combined root straw cutting cutter and the root stubble crushing and shifting cutter were designed by logarithmic helix and Archimedes helix curve, and the structural parameters of the dynamic and fixed combined root straw cutting cutter and the root stubble crushing and shifting cutter were determined through dynamic analysis. The forward speed of the machinery, the depth of the root stubble crushing and shifting cutter into the soil, and the rotational speed of device were selected as the test factors, and the straw clearance rate of the seed bed and the coefficient of variation of the seed bed width were taken as the test indicators to conduct the three-factor and three-level orthogonal

收稿日期：2025-07-28　修回日期：2025-08-18

基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFD2000401-2)、山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2023TSGC0339)和山东省农业重大技术协同推广项目(SDNYXYYG-2024-03)

作者简介：张银平(1989—)，女，副教授，博士生导师，上海交通大学博士后，主要从事智能农机装备研究，E-mail：zhangyinping929@163.com

通信作者：周华(1991—)，男，讲师，博士，主要从事旱作智能农机装备研究，E-mail：zhouhua688@163.com

rotation combination test. The regression models and response surface mathematical models of each factor and indicator were established. The test results showed that the optimal parameter combination was as follows: the forward speed of the machinery was 9 km/h, the depth of the root stubble crushing and shifting cutter into the soil was 70 mm, and the rotational speed of device was 515 r/min. At this time, the straw removal rate of the seed belt was 92.59%, the coefficient of variation of the seed belt width was 7.77%, and the machinery pass rate was qualified, meeting the operation requirements of the no-tillage planter for corn in the Huang-Huai-Hai two-cropping area. The research result can provide a reference for the design and improvement of the seed bed preparation device of the no-till seeding machine for corn in plots with high stubble retention.

Key words: no-till seeding; seed bed preparation device; combined dynamic and fixed root straw cutter; root stubble crushing and shifting cutter; sliding cutting

0 引言

免耕播种是保护性耕作的关键技术之一,对改善土壤结构、减少土壤破坏具有重要作用[1-2]。高质量的种床整备是免耕播种机不发生壅堵、高效作业的关键,同时无根茬与秸秆的种床更能保证播种质量,有利于提高作物产量,郝泽华等[3]研究表明,播在干净种床的玉米产量比播在有秸秆种床上的玉米产量高5%~8%。麦茬地存在小麦根茬密、抢收地块留茬高,根茬难破碎、种床秸秆清理装置缠绕等问题,严重影响作业效率和播种质量,限制了麦茬地玉米单产潜力的发挥。高效清秸破茬种床整理装置是提高麦茬地玉米免耕播种质量和效率的关键。

目前国内外免耕播种机的种床整理装置主要有被动式和主动式[4-7]。其中被动式多依赖机具自身重力,通过切茬圆盘将根茬和秸秆切断,并通过对置拨草轮(盘)将切断的根茬和秸秆分拨在种床两侧,多应用于牵引式重型免耕播种机,麦茬地轻型免耕播种机重力不足,切茬圆盘难以将根茬或秸秆切断,而将其压入土壤,使玉米种粒播在根茬或秸秆上,导致苗黄、苗弱,造成减产。尤其在高留茬地块,根茬地上秸秆(后文简称根秸)长,被动拨草轮易缠绕,成为引发播种机壅堵的主要部件,因此麦茬地多使用主动式种床整理装置。主动式种床整理装置按刀轴分布方式分为卧式和立式[8-12]。卧式多以旋耕清秸破茬为主,动力消耗大,旋耕刀对土壤侧面和底面产生挤压,长期作业形成犁底层。蒋金琳等[13]利用卧式主动清茬盘,先将根茬破碎然后拨离抛送至作业部件后方,防止作业部件拥堵,然而根茬高密状态下,卧式圆盘类切茬刀平行进入根秸间隙而无法将根茬切断和破碎移除。基于立式清秸防堵与种床整理技术,高娜娜[14]和牛萌萌等[15]在开沟部件前增加立式环绕引导机构,通过引导秸秆攀升、实现层叠堆积,缓解秸秆平行拨离种带时造成的秸秆局部集中;王韦韦等[16]设计了立式秸秆移位防堵装置,种床秸秆在立式回转装置旋转扰动作用下,沿着回转刀尖切线方向被移到种床一侧,播种行无秸秆。立式回转类装置不入土破茬且无法切割根茬,在秸秆覆盖量大,留茬高的地块作业,极易出现缠绕、根茬堵塞问题。

基于“根茬切割破碎移位”的种床整理思路,本文设计切秸破茬种床整理装置,利用装置上部安装的动定组合式根秸切割刀,在根茬破碎移位刀接触高留茬秸秆前将根茬地上高秸秆切断,防止缠绕下部根茬破碎移位刀;根茬破碎移位刀在旋转前进运动过程中先利用刃口将小麦根茬-土壤复合体打破,再利用刃口结构曲线将破碎后的根茬移出种床,为免耕播种创造干净种床以提高免耕播种质量。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

切秸破茬种床整理装置安装在播种单体前方,结构如图1所示,主要由安装架、换向器、联轴器、高度调节装置、动定刀组合式根秸切割装置和根茬破碎移位装置组成,其中动定刀组合式根秸切割装置和根茬破碎移位装置上下同轴安装。动定刀组合式根秸切割装置由爪盘形动刀和爪形定刀组成,爪盘形动刀通过套筒与根茬破碎移位装置同轴转动,爪形定刀通过安装架固定在高度调节装置底板上;根茬破碎移位装置由一对立式曲线刀组成,通过法兰盘固定。动定刀组合式根秸切割装置和根茬破碎移位装置作业高度可调整,满足不同留茬高度作业。

1.2 工作原理

切秸破茬种床整理装置工作原理如图2所示,工作时:驱动电机输出轴通过换向器将横向动力转为竖向动力,驱动竖向传动套筒,带动中心轴上的根秸切割动刀和根茬破碎移位刀旋转,根秸切割动刀盘回转半径大于根茬破碎移位刀回转半径,可在根茬破碎移位刀接触到根茬前将根秸切断,防止根茬破碎移位刀被长根秸缠绕;根茬破碎移位刀将根茬-

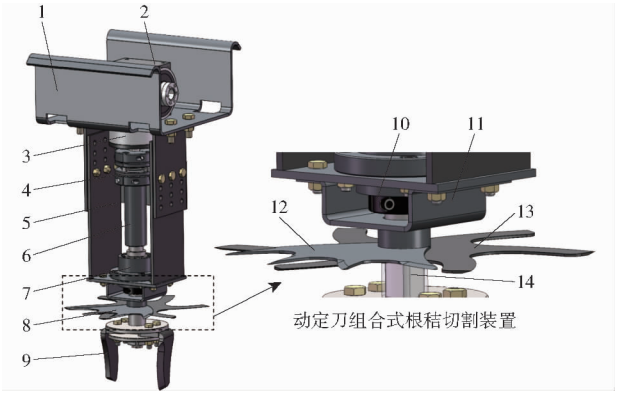

图 1　切秸破茬种床整理装置结构

Fig. 1　Structural schematic of straw cutting, stubble breaking and seed bed preparation device

1. 安装架　2. 换向器　3. 减速器　4. 联轴器　5. 高度调节装置　6. 传动套筒　7. 轴承座　8. 动定刀组合式根秸切割装置　9. 根茬破碎移位装置　10. 锁轴固定环　11. 定刀安装架　12. 定刀　13. 动刀　14. 中心传动轴

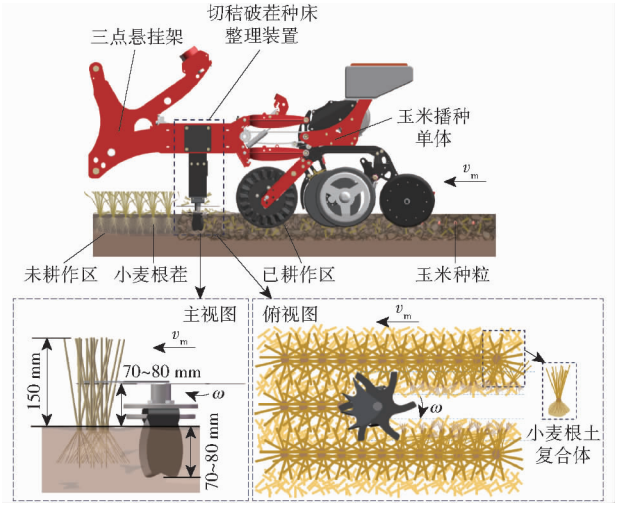

图 2　切秸破茬种床整理装置工作原理

Fig. 2　Working principle diagram of straw cutting, stubble breaking and bed preparation device

土壤复合体打破并将破碎后的根茬、秸秆移出种床，为免耕播种创造干净种床，提高免耕播种质量。

2　关键部件设计

2.1　动定刀组合式根秸切割装置结构设计

2.1.1　切割刀刃口曲线设计

切割刀刃口曲线形状影响切割效果和切割能耗，相同条件下，滑切比正切阻力小、切割省力。设计合理的刃口曲线可实现滑切，根秸切割刀刃口曲线设计为对数螺线（又称等滑切角曲线）[17-18]，如图 3 所示。以切割刀回转中心为坐标原点，以机具前进方向为 x 轴，以垂直机具前进方向为 y 轴，在动刀平面内建立 xOy 坐标系，M 为刃口曲线上初始切割点，r 为该点矢径，mm；M'为绕切割刀回转中心转动角度d_φ后刃口曲线上的任意切割点，r'为该点矢径，mm；D 为点 M 在 OM'上的垂直投影，D'为以点 O 为中心、以 r 为半径转动后与 OM'的交点，dr 为矢径增量，mm。

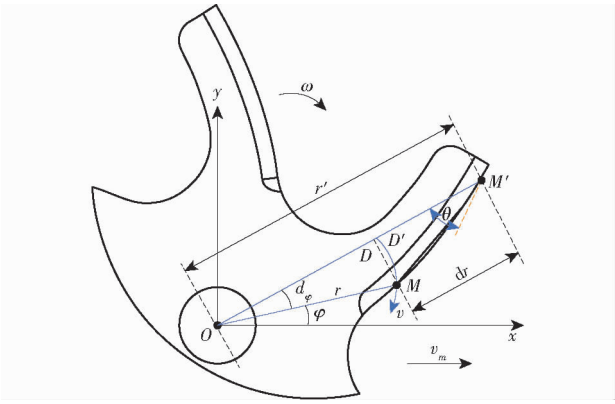

图 3　对数螺旋线刃口曲线图

Fig. 3　Logarithmic spiral blade curve graph

根据对数螺旋线特点，切割点 M 在刃口曲线上的任意位置，滑切角 θ 均为定值[19]。设对数螺旋线极坐标方程为 $r=f(\theta)$，点 M 极坐标为$(f(\theta),\theta)$，滑切角与极角关系为

$$\cos\varphi=\frac{\cos\theta(f'(\theta)\cos\theta-f(\theta)\sin\theta)+\sin\theta(f'(\theta)\sin\theta+f(\theta)\cos\theta)}{\sqrt{f'^2(\theta)+f^2(\theta)}}=\frac{f'(\theta)}{\sqrt{f'^2(\theta)+f^2(\theta)}} \tag{1}$$

$$\cot\varphi=\frac{\cos\varphi}{\sqrt{1-\cos^2\varphi}}=\frac{\dfrac{f'(\theta)}{\sqrt{f'^2(\theta)+f^2(\theta)}}}{\sqrt{1-\dfrac{f'^2(\theta)}{f'^2(\theta)+f^2(\theta)}}}=\frac{f'(\theta)}{f(\theta)} \tag{2}$$

式中　φ——刃口起始点角度，(°)

将式(2)两端积分得

$$\ln f(\theta)=\theta\cot\varphi+\ln r_0 \tag{3}$$

即

$$r=r_0e^{\theta\cot\varphi} \tag{4}$$

式中　r_0——切割刀刃口起始位置点 M 到极点 O 的距离，mm

综合考虑安装尺寸和切割范围，设计r_0为 75 mm，代入式(4)得动刀刃口曲线方程为

$$r=75e^{\theta\cot\varphi} \tag{5}$$

为减小切割阻力，设计定刀刃口曲线与动刀刃口曲线相同，并与动刀对置安装，形成剪刀状切割姿态，并留有足够的滑切刀刃线，减少漏切范围，如图 4 所示。为保证定刀作业稳定，定刀刃口起始位置比动刀刃口起始位置增加 15 mm，因此定刀刃口起止位置为$r_0'=90$ mm，代入式(4)得定刀刃口曲线方程为

$$r'=90e^{\theta\cot\varphi} \tag{6}$$

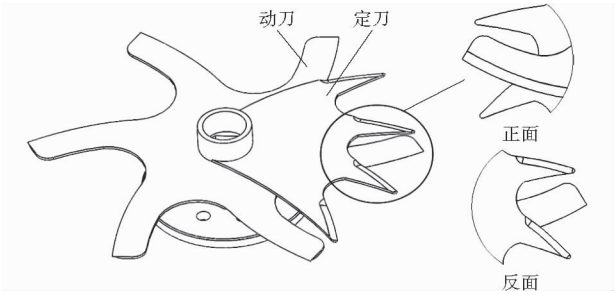

图 4 动定刀安装方式示意图

Fig. 4 Schematic of installation method of moving and fixed knives

2.1.2 切割刀滑切角设计

滑切角是影响刀具切割效果的重要因素[20-21]。滑切角过大可能导致刀具打滑而无法有效切割秸秆,影响切割效率;滑切角过小,会使得滑切效果不明显,切割时切削力集中于挤压和剪切,导致切削力增大,切削功耗增加[22]。

小麦根秸切割过程中,根据动刀与小麦根秸相对位置,存在 2 种切割状态:①根秸与定刀刃口有一定距离,由旋转的动刀带动根秸向定刀运动,在根秸运动过程中将根秸切断。②根秸位于定刀刃口处,直接被动刀和定刀切断。对这 2 种切割状态动、定刀滑切角进行分析。

对第 1 种切割状态进行分析,机具以速度v_m匀速前进,动刀以固定角速度 ω 顺时针转动,设动刀刃口上任意一点处有一根秸,以根秸与刃口的接触点 G 为研究对象,对切割过程中根秸受力进行分析,如图 5 所示,$A-A'$为刃口与茎秆接触点切线;$n-n'$为刃口与秸秆接触点法线。

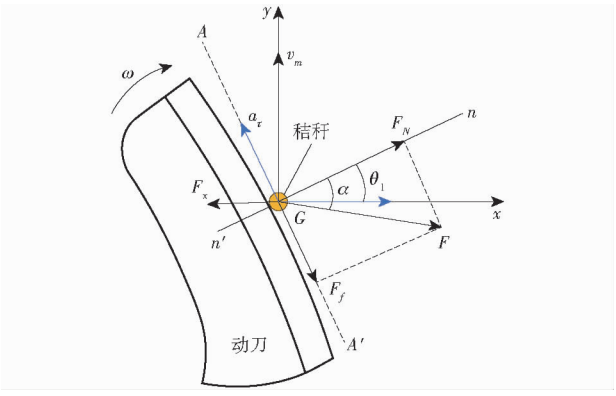

图 5 切割刀刃口受力分析

Fig. 5 Force analysis diagram of cutting edge of cutter

建立力平衡方程为

$$\begin{cases} F_N\cos\theta + F_f\sin\theta - F_x = m(a_x - a_\tau\sin\theta) \\ F_N\sin\theta - F_f\cos\theta = ma_\tau\cos\theta \\ F_f = F_N\tan\alpha \end{cases} \tag{7}$$

式中 α——根秸与切割刀的滑动摩擦角,(°)

F_N——切割刀刃口对根秸的法向力,N

F_f——摩擦力,N

F——F_N与F_f合力,N

F_x——根秸内部对接触点 G 处的摩擦力,N

a_τ——切向加速度,m/s^2

a_x——水平加速度,m/s^2

假设在切割过程中根秸保持静止不动,切割刀刃口相对于根秸加速运动主要发生在 $A-A'$方向,即根秸沿着刃口切线方向加速运动,因此可忽略a_x在 x 方向上对加速度影响。

整理式(7)得

$$F_N(\tan\theta - \tan\alpha) = ma_\tau \tag{8}$$

对第 2 种切割状态进行分析,此时根秸同时与动刀和定刀接触,受到动刀刃口的正压力N_1、定刀刃口的正压力N_2,以及来自动刀和定刀刃口曲线切线方向上摩擦力f_1、f_2,如图 6 所示。

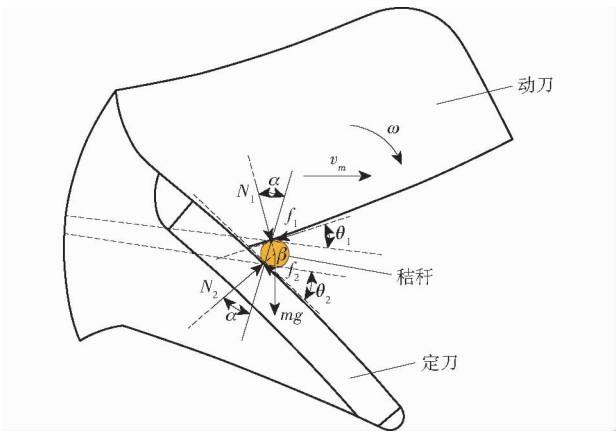

图 6 切割过程受力分析

Fig. 6 Force analysis diagram of cutting process

为实现动刀与定刀夹持根秸过程完成剪切,需满足

$$\beta + 2\alpha \leqslant \pi \tag{9}$$

根据几何关系

$$\beta + \theta_1 + \theta_2 = \pi \tag{10}$$

由式(9)、(10)得到

$$\theta_1 + \theta_2 \geqslant 2\alpha \tag{11}$$

式中 θ_1——动刀滑切角,(°)

θ_2——定刀滑切角,(°)

β——正压力夹角,(°)

根据式(8)可知,小麦根秸与切割刀产生滑切效果的条件为$a_\tau > 0$,即 $\tan\theta > \tan\alpha$;根据式(11)可知,$\theta_1 + \theta_2 \geqslant 2\alpha$,因为设计动刀与定刀的滑切角相等,即 $\theta = \theta_1 = \theta_2$,由式(8)、(11)得到 $\theta > \alpha$。通过测定小麦根秸与钢板摩擦角为 14 ~ 23°,静摩擦因数为 0.25 ~ 0.45,因此切割刀滑切角 θ 设计应大于 23°,查阅文献[18],刀具滑切角为 25° ~ 55°能产生

较好的滑切效果，设计滑切角 θ 为 30°。

2.1.3　切割刀齿数设计

切割动刀刀齿数是影响秸秆切割效果的重要因素之一。刀齿过少会导致相邻切割间隔过大，距离定刀较远的根秸产生偏斜过大，会出现漏割或撕裂现象，尤其在机具高速作业时更明显，适当增加刀齿数可缩短切割间隔，提升切割均匀性，确保切口整齐。但刀齿数过多会增加切割阻力，导致驱动功率增大，加剧刀盘振动，同时易引发堵塞[23]。

动刀每转一周时间 Δt 为

$$\Delta t = \frac{60}{n} \tag{12}$$

式中　n——装置转速，r/min

动刀旋转一周机具前进距离，即切割进距 ΔS 为

$$\Delta S = v_m \Delta t = v_m \frac{60}{n} \tag{13}$$

为避免出现漏切，相邻刀齿切割过程机具前进距离需小于允许切割进距 S，即

$$\frac{60\ v_m}{Zn} < S \tag{14}$$

由此确定动刀齿数

$$Z > \frac{60\ v_m}{nS} \tag{15}$$

式中　Z——刀齿数

小麦等细茎作物 S 取 0.06 m[24]。

避免刀齿数过多引起堵塞以及机具作业功耗增加，机具前进速度按 10 km/h 计算，即 v_m 为 2.8 m/s，刀具旋转速度 n 为 500 r/min，代入式(15)得 $Z > 5.6$，因此动刀刀齿数取整 Z 取 6。根据切割曲线设计切割动刀回转半径为 130 mm，刀体宽度为 25 mm，刀片厚度为 3 mm，刃楔角为 15°，动刀结构及参数如图 7 所示。

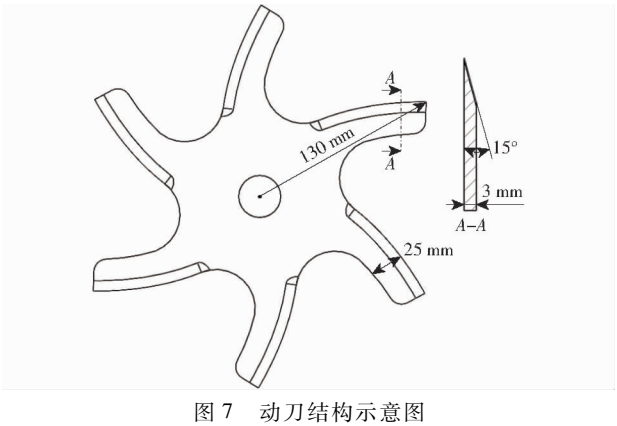

图 7　动刀结构示意图

Fig. 7　Schematic of moving cutter structure

小麦机收后留茬高度一般为 150 mm 左右[25]，小麦根秸为分蘖后多株发散茎秆，通过测量距地面高度 70 ~ 80 mm 处小麦根秸幅宽在 200 mm 以内，作业时只需在装置正前方 90°范围内完成切割即可保证种床宽度范围内根秸有效清理。根据定刀刃口曲线，设计定刀回转半径为 130 mm，刀片厚度 3 mm，刃楔角 20°，刀齿形状为爪形，在 90°范围内 4 个刀齿均匀分布，通过刀齿将根秸分散切割，减小动刀切割阻力，切割定刀结构及参数如图 8 所示。

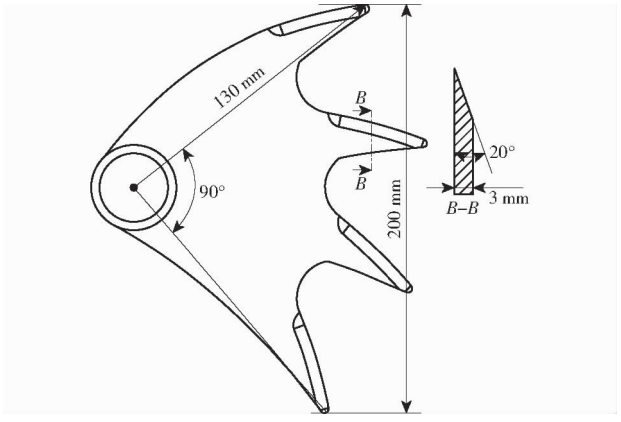

图 8　定刀结构示意图

Fig. 8　Schematic of fixed knife structure

2.2　根茬破碎移位装置结构设计

2.2.1　破碎移位刀刃口曲线设计

刃口曲线是影响根茬破碎移位效果和作业功耗的重要参数之一。刃口上各点滑切角为该点速度方向与该点处刃口法线夹角，根茬破碎移位刀以固定角速度 ω 转动，刀片绝对速度 v 方向为其相对速度 v_r 与机具匀速前进速度 v_m 矢量和，此时滑切角为动态滑切角[26]。以根茬破碎移位刀回转中心为原点，以机具前进方向为 x 轴，以耕深方向为 y 轴，在竖直平面内建立 xOy 坐标系，选取根茬破碎移位刀上一点 Q 为研究对象，对根茬破碎移位刀刃口曲线进行分析，如图 9 所示。

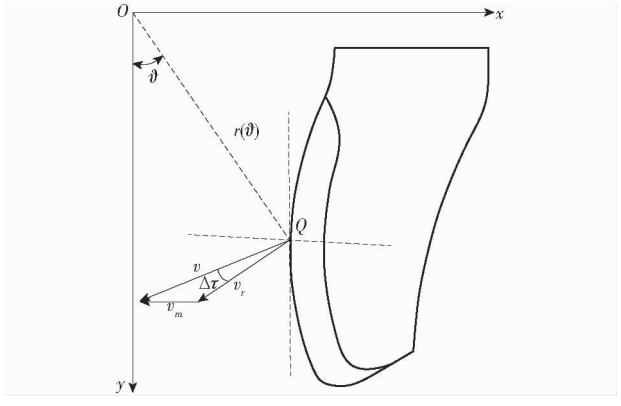

图 9　根茬破碎移位刀刃口曲线分析图

Fig. 9　Analysis diagram of cutting edge curve of root stubble crushing and shifting cutter

根茬破碎移位刀刃口曲线可表示为

$$\begin{cases} x = r(\vartheta)\sin\vartheta \\ y = r(\vartheta)\cos\vartheta \\ z = z(\vartheta) \end{cases} \tag{16}$$

刃口曲线上任意一点 ρ 可表示为

$$\rho = r(\vartheta)\sin\vartheta \boldsymbol{i} + r(\vartheta)\cos\vartheta \boldsymbol{j} + z(\vartheta)\boldsymbol{k} \tag{17}$$

式中 ϑ——刃口曲线上任意点与 y 轴夹角，rad

$r(\vartheta)$——刃口曲线上任意点极径，mm

参照文献[26]，令 $\theta = \vartheta + \omega t$，$r'(\vartheta) = \mathrm{d}r(\vartheta)/\mathrm{d}\vartheta$，$z' = z'(\vartheta) = \mathrm{d}z(\vartheta)/\mathrm{d}\vartheta$，$z' = 0$ 时，刃口曲线动态滑切角 τ 为

$$\tau = \arctan\frac{|\omega r(\vartheta)r'(\vartheta) - v_m r(\vartheta)\sin\theta' + v_m r'(\vartheta)\cos\theta'|}{\omega r^2(\vartheta) + v_m r(\vartheta)\cos\theta' + v_m r'(\vartheta)\sin\theta'} \tag{18}$$

式中 θ'——根茬破碎移位刀滑切角，(°)

机具作业时，根茬破碎移位刀刃口曲线上点的动态滑切角与静态滑切角差值为 $\Delta\tau$，根据三角关系得

$$\begin{cases} v_r^2 = r^2(\vartheta)\omega^2 + v_m^2 + 2r(\vartheta)\omega v_m\cos\vartheta \\ v_m^2 = v_r^2 + r^2(\vartheta)\omega^2 - 2v_r r(\vartheta)\omega\cos\Delta\tau \end{cases} \tag{19}$$

式中 v_r——根茬破碎移位刀相对速度，m/s

求解得

$$\Delta\tau = \arctan\frac{v_m}{\omega r(\vartheta)} \tag{20}$$

根据式(20)可知，机具前进速度 v_m 越大或旋转角速度 ω 越小，动态滑切角与静态滑切角差值 $\Delta\tau$ 越大，反之越小。根茬破碎移位刀刃口曲线采用阿基米德螺旋曲线[27]时，滑切角由小逐渐变大，使得切碎根茬、秸秆在根茬破碎移位刀旋转作用下沿刃口切线方向移出种床，具有更好的种床整理效果。考虑割刀安装、根茬破碎移位刀入土深度，设计根茬破碎移位刀刃口起始位置 $r(\vartheta_1)$ 为 100 mm，计算得末端位置 $r(\vartheta_2)$ 为 127.28 mm，刃口曲线方程为

$$r(\vartheta) = 100 + 34.73\vartheta \tag{21}$$

2.2.2 根茬破碎移位刀结构参数

作业过程中，根茬破碎移位刀运动轨迹是由自身旋转运动和机具前进运动合成的余摆线，在运动过程产生的冲击和动态切削力复合载荷作用下，根茬与土壤间的粘结力被破坏，原本连续的根茬-土壤复合体被离散化为细碎的根茬段、疏松的土壤颗粒及小团聚体。传统立式旋耕刀未设计安装角，使得刀背比刀刃更早接触到未耕种的土壤而产生“抗土”效应[28]，从而增加刀具作业时的载荷，导致运行不稳定、作业质量降低。因此，根茬破碎移位刀安装角对根茬破碎、根秸移除性能有重要影响。安装角过小，刀具与土壤接触角度较小，刀具在切削时会产生更大的摩擦力，导致作业扭矩增加；倾角过大可能会导致刀具与土壤接触角度过大，使得刀具在切削过程中产生较大的侧向力。

以根茬破碎移位刀的回转中心为原点，前进速度方向为 x 轴，垂直于机具前进速度且平行于地面方向为 y 轴，建立 xOy 坐标系，如图 10 所示。刃口外侧一点为 A，刀背外侧一点为 B，刀具安装角为 δ，刃口回转半径为 R，根茬破碎移位刀刃口上任意一点 P 运动轨迹方程可表示为

$$\begin{cases} x_p = v_m t + R\cos(\omega t) + l\cos(\omega t + \psi) \\ y_p = R\sin(\omega t) + l\cos(\omega t + \psi) \end{cases} \tag{22}$$

式中 t——时间，s

l——点 P 与点 O 距离，m

ψ——点 P 在刀片上的方位角，rad

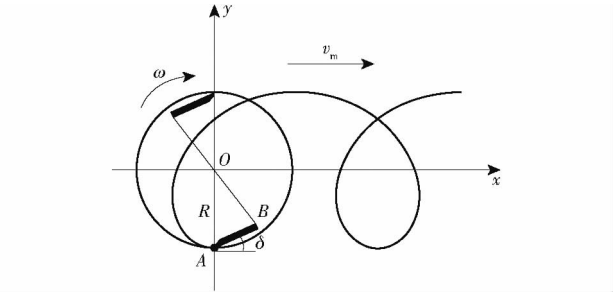

图 10 根茬破碎移位刀运行轨迹

Fig. 10 Running trajectory diagram of root stubble crushing and shifting cutter

当 $y_A(t) = 0$、$y_B(t) = 0$ 时，即为刃口与刀背接触未耕土壤时刻；当刃口先接触未耕土壤而刀背未接触时，轨迹方程为

$$y_A(t_B) = R\sin(\omega t_B) + l_A\sin(\omega t_B) > 0 \tag{23}$$

式中 l_A——OA 长度，m

t_B——转动到点 B 的时间，s

代入式(22)整理得

$$\frac{l_B\sin(\omega t_B + \delta)}{l_A\sin(\omega t_B)} > 1 \tag{24}$$

式中 l_B——OB 长度，m

当 $\omega t_B = \pi/2$ 时，得临界角

$$\delta' = \arcsin\frac{l_A}{l_B} \tag{25}$$

当 $\delta > \delta'$ 时，满足安装要求。根茬破碎移位刀的安装角过大或过小都不利于刀具切削土壤，一般选取刀具安装角 δ 为 5° ~ 15°[29]，本文安装角 δ 取 10°。

根茬破碎移位刀刃口上一点的圆周速度与机具前进速度之比为速比 λ 为

$$\lambda = \frac{R\omega}{v_m} = \frac{\pi R n}{30 v_m} \tag{26}$$

根茬破碎移位刀回转半径为 0.11 m，取机具前进速度 v_m 为 2.8 m/s，参照文献[30 - 31]，λ 取 1 ~ 4，

为选取最佳作业效果取 $\lambda=2\sim3$，代入式(26)可得转速 n 为 486～730 r/min。

根茬破碎移位刀结构及主要参数如图 11 所示，为保证根茬破碎移位刀作业切削性能和强度，刀刃背部厚度取 10 mm，考虑安装刀盘直径、刀具回转半径，设计根茬破碎移位刀宽度为 60 mm，厚度为 10 mm，刀具折弯角为 90°，安装角 δ 为 10°。小麦根茬地下根系主体部分和玉米播种作业深度不超过地表以下 100 mm，因此根茬破碎移位刀整体高度为 120 mm，切削刃长度为 100 mm，参照文献[31]选取刀具刃楔角 γ 为 40°。

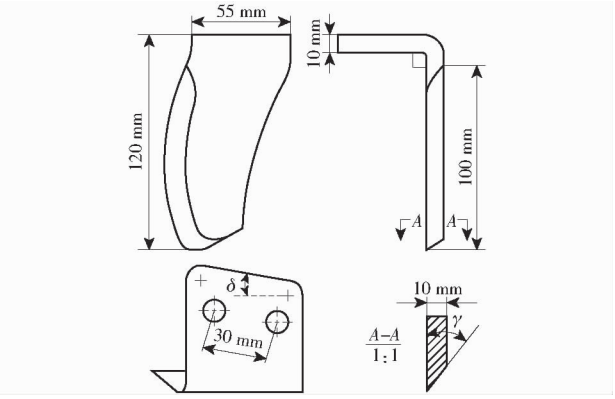

图 11　根茬破碎移位刀结构及主要参数

Fig. 11　Structure and main parameters of root stubble crushing and shifting cutter

3　田间试验

3.1　试验条件与设备

田间试验在淄博临淄富群农机合作社田间进行，将切秸破茬种床整理装置安装在青岛三山机电科技发展有限公司 PEECON 2BQMF－4 型免耕施肥播种机前端，由巨明 M2104 型轮式拖拉机牵引作业。试验地块留茬高度平均为 200 mm，秸秆含水率平均为 13.23%，残茬覆盖量平均为 0.67 kg/m^2，采用 TZS－Ⅱ W 型土壤水分测量仪测得土壤含水率为 13.4%，使用 TJS－450G 型土壤紧实度仪测得土壤紧实度为 3 841 kPa，试验现场如图 12 所示。

3.2　试验评价指标测定方法

3.2.1　机具通过性

根据文献[32]，田间试验在测量区内进行长度为 60 m 的播种作业，测定 3 个往返行程，统计正常速度下单次往返能否连续正常作业，并统计发生轻度、中度和重度堵塞次数，不堵塞或有轻度堵塞视为合格。

3.2.2　种带清秸率

为保证玉米播种质量，需清理出宽度不小于



图 12　田间试验现场

Fig. 12　Field test site

100 mm 的种带。试验前采用 5 点取样法在机具前进方向随机选取长度为 1 m，宽度为 100 mm 的区域，收集该区域内根茬和秸秆，并称量，计算平均质量为 m_q；每个行程作业结束后，在 4 行播种带上随机选取长度为 1 m，宽度为 100 mm 内区域未被移除的根茬和秸秆，称量，重复 5 次，计算平均质量为 m_h，得到切秸破茬种床整理装置种带清秸率计算式为[33]

$$Y_1=\left(1-\frac{m_h}{m_q}\right)\times100\% \tag{27}$$

式中　Y_1——种带清秸率，%

3.2.3　种带宽一致性

种带宽一致性是衡量种床整理质量的重要指标，测定种带宽变异系数作为种带宽一致性的评价指标，种带宽变异系数越小表明种带宽一致性越好[34]。试验结束后在播种行上随机选取 20 个样点，避免田边、地头等干扰区域，使用钢板尺测量采样点种带宽度。种带宽变异系数计算式为

$$Y_2=\frac{\sigma}{\bar{L}}\times100\% \tag{28}$$

其中

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(L_i-\bar{L})^2}{N-1}} \tag{29}$$

$$\bar{L}=\frac{\sum_{i=1}^{N}L_i}{N} \tag{30}$$

式中　Y_2——种带宽变异系数，%

σ——种带宽标准差，mm

$\bar{L}$——种带宽平均值，mm

L_i——第 i 个点种带宽度，mm

N——测定样点数

3.3 试验设计

根据前文相关参数分析,试验选取机具前进速度 v_m、根茬破碎移位刀入土深度 h、装置转速 n 为试验因素;种带清秸率 Y_1、种带宽变异系数 Y_2 为试验指标开展三因素三水平正交旋转组合试验。试验分别选取装置前进速度为 6、8、10 km/h;根茬破碎移位刀入土深度为 60、70、80 mm,装置转速为 500、530、560 r/min,其因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Factors and codes

编码	因素		
	机具前进速度 v_m/(km·h^{-1})	根茬破碎移位刀入土深度 h/mm	装置转速 n/(r·min^{-1})
-1	6	60	500
0	8	70	530
1	10	80	560

3.4 试验结果分析

通过 Design-Expert 10.0.4 软件对试验方案进行设计和结果分析,试验结果如表 2 所示,x_1、x_2、x_3 为因素编码值。

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Test design and results

试验序号	因素			Y_1/%	Y_2/%
	x_1	x_2	x_3		
1	0	0	0	93.47	7.74
2	0	-1	1	89.13	8.49
3	0	-1	-1	92.34	8.37
4	1	1	0	89.81	7.95
5	-1	1	0	87.82	8.25
6	0	0	0	93.13	7.62
7	-1	0	1	87.81	8.39
8	-1	0	-1	87.33	8.23
9	0	0	0	94.03	7.89
10	0	1	1	87.82	8.48
11	0	1	-1	89.82	7.93
12	0	0	0	93.82	7.92
13	1	0	-1	93.13	7.78
14	-1	-1	0	87.13	8.63
15	1	-1	0	93.81	8.28
16	0	0	0	93.77	7.82
17	1	0	1	91.13	8.21

3.4.1 回归模型与显著性方差分析

方差分析结果如表 3 所示,种带清秸率、种带宽变异系数模型 P 小于 0.01,表明回归模型极显著,且失拟项 P 大于 0.05 不显著,表明试验因素与试验指标之间存在显著二次关系并能较好地匹配实际值。

表 3 方差分析

Tab. 3 Variance analysis

项目	方差来源	平方和	自由度	F	P
种带清秸率 Y_1	模型	112.42	9	38.84	<0.000 1 **
	x_1	39.56	1	123.00	<0.000 1 **
	x_2	6.37	1	19.81	0.003 0 **
	x_3	5.66	1	17.60	0.004 1 **
	x_1x_2	5.50	1	17.10	0.004 4 **
	x_1x_3	1.54	1	4.78	0.065 0
	x_2x_3	0.37	1	1.14	0.321 5
	x_1^2	16.25	1	50.52	0.000 2 **
	x_2^2	17.47	1	54.32	0.000 2 **
	x_3^2	14.09	1	43.82	0.000 3 **
	残差	2.25	7		
	失拟项	1.76	3	4.79	0.082 2
	误差	0.49	4		
	总和	114.67	16		
种带宽变异系数 Y_2	模型	1.41	9	16.13	0.000 7 **
	x_1	0.20	1	21.03	0.002 5 **
	x_2	0.17	1	17.27	0.004 3 **
	x_3	0.20	1	20.37	0.002 8 **
	x_1x_2	0.000 6	1	0.064	0.807 3
	x_1x_3	0.018	1	1.87	0.213 6
	x_2x_3	0.046	1	4.75	0.065 8 *
	x_1^2	0.10	1	10.69	0.013 7 *
	x_2^2	0.44	1	44.89	0.000 3 **
	x_3^2	0.16	1	16.82	0.004 6 **
	残差	0.068	7		
	失拟项	0.009	3	0.21	0.884 4
	误差	0.059	4		
	总和	1.48	16		

注:* 表示差异显著($0.01 \leqslant P < 0.05$);** 表示差异极显著($P < 0.01$)。

由表 3 可知,x_1、x_2、x_3、x_1x_2、x_1^2、x_2^2、x_3^2 对种带清秸率模型有极显著影响,对种带清秸率 Y_1 的主要影响因素由大到小为:x_1、x_2、x_3;x_1、x_2、x_3、x_2^2、x_3^2 对种带宽变异系数模型有极显著影响,对种带宽变异系数 Y_2 的主要影响因素由大到小为:x_1、x_3、x_2。对试验结果进行回归拟合分析,得到种带清秸率、种带宽变异系数二次回归模型为

$$Y_1 = 93.64 + 2.22x_1 - 0.89x_2 - 0.84x_3 - 1.17x_1x_2 - 0.62x_1x_3 + 0.30x_2x_3 - 1.96x_1^2 - 2.04x_2^2 - 1.83x_3^2 \tag{31}$$

$$Y_2 = 7.80 - 0.16x_1 - 0.14x_2 + 0.16x_3 + 0.013x_1x_2 + 0.068x_1x_3 + 0.11x_2x_3 + 0.16x_1^2 + 0.33x_2^2 + 0.20x_3^2 \tag{32}$$

3.4.2 响应曲面

为确定较优作业参数,利用 Design-Expert 10.0.4 软件绘制响应曲面,并据此分析机具前进速度、根茬破碎移位刀入土深度、装置转速交互作用对

评价指标的影响。各因素交互作用对种带清秸率影响的响应曲面如图 13 所示。由图 13a 可知，装置转速为 530 r/min，根茬破碎移位刀入土深度一定时，种带清秸率随机具前进速度增加先升高后降低；机具前进速度一定时，种带清秸率随根茬破碎移位刀入土深度增加先升高后降低。由图 13b 可知，当根茬破碎移位刀入土深度为 70 mm，机具前进速度一定时，种带清秸率随装置转速增加先升高后降低；装置转速一定时，种带清秸率随机具前进速度增加先升高后降低。由图 13c 可知，当机具前进速度为 8 km/h，装置转速一定时，种带清秸率随根茬破碎移位刀入土深度增加先升高后降低；根茬破碎移位刀入土深度一定时，种带清秸率随装置转速增加先升高后降低。当机具前进速度为 8.5 ~ 9.5 km/h、根茬破碎移位刀入土深度为 65 ~ 70 mm、装置转速为 515 ~ 525 r/min 时，种带清秸率达到最高值。

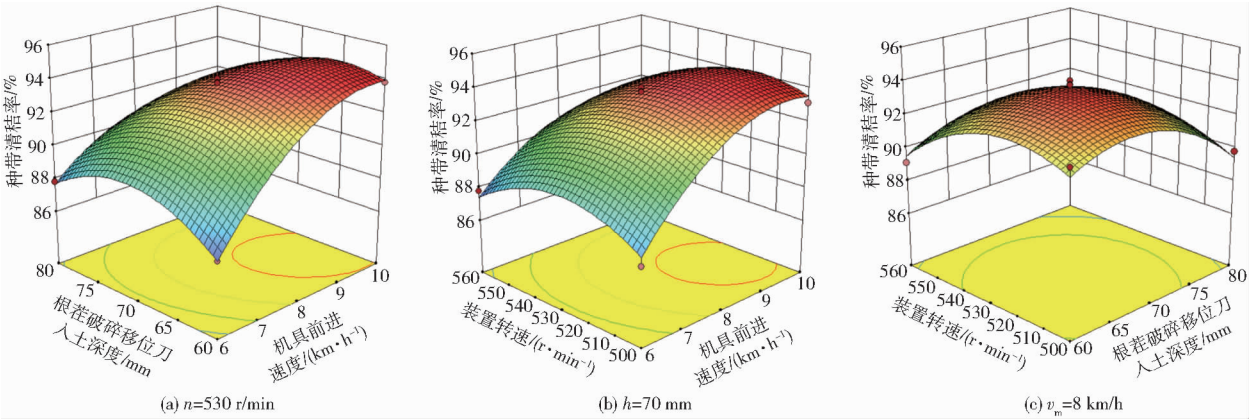

图 13　各因素对种带清秸率影响的响应曲面

Fig. 13　Response surfaces of influence of various factors on straw removal rate of seed belt

各因素交互作用对种带宽变异系数影响的响应曲面见图 14。由图 14a 可知，当装置转速为 530 r/min，根茬破碎移位刀入土深度一定时，种带宽变异系数随机具前进速度增加先降低后升高；机具前进速度一定时，种带宽变异系数随根茬破碎移位刀入土深度的增加先降低后升高。由图 14b 可知，当根茬破碎移位刀入土深度为 70 mm，机具前进速度一定时，种带宽变异系数随装置转速增加先降低后升高；装置转速一定时，种带宽变异系数随机具前进速度增加先降低后升高。由图 14c 可知，当机具前进速度为 8 km/h，装置转速一定时，种带宽变异系数随根茬破碎移位刀入土深度增加先降低后升高；当根茬破碎移位刀入土深度一定时，种带宽变异系数随装置转速增加先降低后升高。当机具前进速度为 8.5 ~ 9.5 km/h、根茬破碎移位刀入土深度为 70 ~ 75 mm、装置转速为 510 ~ 530 r/min 时，种带宽变异系数达到最低值。

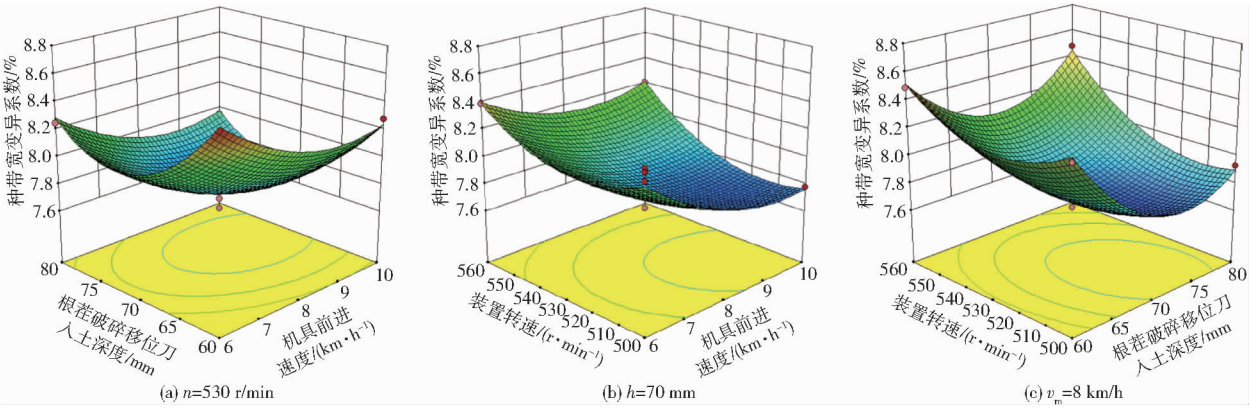

图 14　各因素对种带宽变异系数影响的响应曲面

Fig. 14　Response surfaces of influence of various factors on coefficient of variation of bandwidth

3.4.3　参数优化

为获得切秸破茬种床整理装置的最优作业参数组合，采用多目标变量优化方法，遵循提高种带清秸率和降低种带宽变异系数的原则，利用 Design-Expert 10.0.4 软件中的优化模块对上述回归模型进行约束目标优化求解，根据各试验因素边界条件建立目标函数为

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1,x_2,x_3) \\ \min Y_2(x_1,x_2,x_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant x_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{33}$$

根据目标函数优化求解后,得到最优参数组合:机具前进速度为 9.21 km/h、根茬破碎移位刀入土深度为 71.83 mm、装置转速为 514.94 r/min,此时种带清秸率为 94.03%、种带宽变异系数为 7.69%。

3.5 试验验证

根据实际作业情况调整切秸破茬种床整理装置作业参数组合为机具前进速度为 9 km/h、根茬破碎移位刀入土深度为 70 mm、装置转速为 515 r/min,在此作业工况下重复试验验证,所得验证试验结果如表 4 所示。

表 4 验证试验结果

Tab.4 Verification experiment results

序号	机具通过性	种带清秸率/%	种带宽变异系数/%
1	合格	92.14	7.76
2	合格	93.21	7.74
3	合格	92.43	7.81
平均值	合格	92.59	7.77

验证试验得种带清秸率、种带宽变异系数分别为 92.59% 和 7.77%,与优化得到的预测值相对误差分别为 1.5%、1.0%,均小于 5%,验证试验结果与参数优化结果基本一致,验证了优化结果可靠性。机具通过性合格,满足玉米免耕播种作业要求。

4 结论

(1)设计了切秸破茬种床整理装置,通过动定组合式根秸切割刀将高留茬秸秆切断的同时根茬破碎移位刀将根茬破碎后将其移出种床,清理出干净播种带,保证玉米播种作业质量。

(2)通过对切秸破茬种床整理装置作业过程及受力情况的理论分析,设计根秸切割刀的爪盘形动刀和爪形定刀刃口曲线为对数螺旋线,设计根茬破碎移位刀刃口曲线为阿基米德螺旋线,并确定了根秸切割刀与根茬破碎移位刀的结构参数。

(3)将切秸破茬种床整理装置安装在玉米免耕播种机上进行田间试验,以机具前进速度、根茬破碎移位刀入土深度、装置转速为试验因素。采用 Box-Behnken 三因素三水平正交试验建立以种带清秸率和种带宽变异系数为试验指标的二次回归模型,通过方差分析和响应曲面分析得到了各因素对试验指标的影响规律。利用 Design-Expert 10.0.4 软件对回归模型进行优化,得到切秸破茬种床整理装置最佳工作参数组合为:机具前进速度为 9.21 km/h、根茬破碎移位刀入土深度为 71.83 mm、装置转速为 514.94 r/min,此时种带清秸率为 94.03%、种带宽变异系数为 7.69%。

(4)根据实际作业情况设置切秸破茬种床整理装置工作参数,进行验证试验。得到机具前进速度为 9 km/h、根茬破碎移位刀入土深度为 70 mm、装置转速为 515 r/min 时,种带清秸率为 92.59%、种带宽变异系数为 7.77%,与预测值相对误差分别为 1.5%、1.0%,均小于 5%,满足玉米免耕播种要求。

参 考 文 献

[1] 魏传省.保护性耕作苗带清秸装备研究现状与展望[J].农业科技与装备,2024(5):65-67.
WEI Chuansheng. Research status and prospect of conservation tillage seedling belt straw cleaning equipment [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment,2024(5):65-67. (in Chinese)

[2] 何进, 李洪文, 陈海涛, 等.保护性耕作技术与机具研究进展[J].农业机械学报, 2018,49(4):1-19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progres of conservation tiage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(4):1-19. (in Chinese)

[3] 郝泽华, 康云友, 张银平, 等.山东省玉米机械化播种作业质量对比监测试验分析[J].农机化研究, 2025,47(8):190-195.
HAO Zehua, KANG Yunyou, ZHANG Yinping, et al. Analysis of comparative monitoring experiments on the quality of corn mechanized sowing operations in Shandong Province[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2025,47(8):190-195. (in Chinese)

[4] 王宏立, 张祖立, 张伟, 等.机械化保护性耕作免耕播种机的研究现状及发展趋势[J].农机化研究, 2006,28(10):22-24.
WANG Hongli, ZHANG Zuli, ZHANG Wei, et al. Research situation and development trend of no-till planter for mechanized conservation tillage[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2006,28(10):22-24. (in Chinese)

[5] 于乃群, 任宝柱.免耕播种机的发展现状及前景展望[J].农机使用与维修, 2022(9):27-29.

[6] 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, REN Baozhu, 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)

[7] MATIN M A, DESBIOLLES J M A, FIELKE J M. Strip-tillage using rotating straight blades: effect of cutting edge geometry on furrow parameters[J]. Soil and Tillage Research,2016,155:271-279.

[8] VAITAUSKIENE K, ŠARAUSKIS E, ROMANECKAS K, et al. Design, development and field evaluation of row-cleaners for strip tillage in conservation farming[J]. Soil and Tillage Research,2017,174:139-146.

[9] 张冲, 吴努, 张延化, 等.国内外免耕播种技术发展现状及趋势[J].江苏农业科学, 2018,46(16):1-5.

ZHANG Chong, WU Nu, ZHANG Yanhua, et al. Development status and trend of no-tillage sowing technology at home and abroad[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018,46(16):1 - 5. (in Chinese)

[10] MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A. Furrow parameters in rotary strip-tillage: effect of blade geometry and rotary speed[J]. Biosystems Engineering, 2014,118:7 - 15.

[11] 顾洋, 姜新波, 顿国强. 旋耕机研究现状与发展趋势[J]. 南方农机,2022,53(23):44 - 46.

[12] 黄玉祥, 高鹏洋, 张庆凯, 等. 免耕播种机切茬导草组合式草土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(5):67 - 78.
HUANG Yuxiang, GAO Pengyang, ZHANG Qingkai, et al. Design and experiment of grass-soil separation device with combination of stubble cutting and grass guiding used for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):67 - 78. (in Chinese)

[13] 蒋金琳, 龚丽农, 王东伟, 等. 免耕播种机双刀盘有支撑切茬破茬装置的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012,28(21):17 - 22.
JIANG Jinlin, GONG Linong, WANG Dongwei, et al. Development and experiment for driving double coulters anti-blockage device of no-till planter[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(21):17 - 22. (in Chinese)

[14] 高娜娜. 一年两熟地区拨草与分草组合式玉米免耕播种防堵技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
GAO Nana. Study on anti-blocking technology of pushing and separating approaches for maize no-till planting in two-crops-a-year areas[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[15] 牛萌萌, 方会敏, CHANDIO F A, 等. 秸秆分拨引导式玉米免耕防堵机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019,50(8):52 - 58.
NIU Mengmeng, FANG Huimin, CHANDIO F A, et al. Design and experiment of separating-guiding anti-blocking mechanism for no-tillage maize planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):52 - 58. (in Chinese)

[16] 王韦韦, 朱存玺, 陈黎卿, 等. 玉米免耕播种机主动式秸秆移位防堵装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017,33(24):10 - 17.
WANG Weiwei, ZHU Cunxi, CHEN Liqing, et al. Design and experiment of active straw-removing anti-blocking device for maize no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(24):10 - 17. (in Chinese)

[17] 张喜瑞, 杨幼铭, 刘宏新, 等. 双定刀滑切防缠式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2):36 - 49.
ZHANG Xirui, YANG Youming, LIU Hongxin, et al. Optimal design and experiment of double fixed knife slip-cutting and anti-tangle banana straw crushing and returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(2):36 - 49. (in Chinese)

[18] 郑嘉鑫, 王世顺, 马龙, 等. 三七茎叶采收机仿生切割刀片设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(8):117 - 126.
ZHENG Jiaxin, WANG Shishun, MA Long, et al. Design and experiment of bionic cutting blades for *Panax notoginseng* stem and leaf harvesting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(8):117 - 126. (in Chinese)

[19] 郭茜, 张西良, 徐云峰, 等. 藤茎类秸秆专用切割刀片的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014,30(24):47 - 53.
GUO Qian, ZHANG Xiliang, XU Yunfeng, et al. Design and experiment of cutting blade for cane straw[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(24):47 - 53. (in Chinese)

[20] 周华, 张文良, 杨全军, 等. 滑切型自激振动减阻深松装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019,50(5):71 - 78.
ZHOU Hua, ZHANG Wenliang, YANG Quanjun, et al. Design and test of sliding-cut self-excited vibration drag reduction deep loosening device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):71 - 78. (in Chinese)

[21] 权龙哲, 佟金, 曾百功, 等. 玉米根茬铲切刀具的滑切刃曲线优化设计[J]. 农业工程学报,2011,27(12):13 - 17.
QUAN Longzhe, TONG Jin, ZENG Baigong, et al. Optimal design of sliding cutting edge curve of corn stubble shoveling cutter [J]. Transactions of the CSAE,2011,27(12):13 - 17. (in Chinese)

[22] 刘羊, 黄小毛, 马丽娜, 等. 拨禾链式油葵割台静态滑切角恒定切割器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(1):99 - 108.
LIU Yang, HUANG Xiaomao, MA Li'na, et al. Design and test of static sliding cut angle constant cutting machine for chain oil sunflower harvester header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(1):99 - 108. (in Chinese)

[23] 张武, 宋学锋, 张锋伟, 等. 手扶式韭菜收割机的设计[J]. 林业机械与木工设备, 2024,52(1):64 - 70,75.
ZHANG Wu, SONG Xuefeng, ZHANG Fengwei, et al. Design and simulation analysis of leek harvester[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2024,52(1):64 - 70,75. (in Chinese)

[24] YUAN L, LAN M, HE X, et al. Design and experiments of a double-cutterbar combine header used in wheat combine harvesters[J]. Agriculture, 2023, 13(4):817.

(下转第 18 页)

11 – 15.
FAN Xiantang, ZHANG Bin, MA Pengge, et al. A filter algorithm for laser radar echo signal of multi-Gaussian pulse at low SNR[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(9): 11 – 15. (in Chinese)
[22] 程倩,胡金萍. 基于多激光传感器的高精度三维在线测量技术[J]. 激光杂志,2020,41(12):37 – 40.
CHENG Qian, HU Jinping. High precision 3D online measurement technology based on multi-laser sensor[J]. Laser Journal, 2020, 41(12): 37 – 40. (in Chinese)
[23] 谢敏,赵来定,王召文. 惯性测量单元姿态融合的动态分析[J]. 信息技术与网络安全,2021,40(7):95 – 102.
XIE Min, ZHAO Laiding, WANG Zhaowen. Dynamic analysis of attitude fusion for inertial measurement unit[J]. Information Technology and Network Security, 2021, 40(7): 95 – 102. (in Chinese)
[24] TNUNAY H, LI Z, DING Z. Distributed nonlinear Kalman filter with communication protocol[J]. Information Sciences, 2020, 513: 270 – 288.
[25] MARELLI D, ZAMANI M, FU M, et al. Distributed Kalman filter in a network of linear systems[J]. Systems & Control Letters, 2018, 116: 71 – 77.
[26] 沈跃,张念,孙志伟,等. 基于多速率卡尔曼滤波的植保无人机仿地飞行方法[J]. 农业机械学报,2023,54(3):190 – 197.
SHEN Yue, ZHANG Nian, SUN Zhiwei, et al. Terrain following flight for plant protection UAV based on multi-rate Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 190 – 197. (in Chinese)
[27] DAID A, BUSVELLE E, AIDENE M. On the convergence of the unscented Kalman filter[J]. European Journal of Control, 2021, 57: 125 – 134.
[28] 张兆国,朱时亮,王法安,等. 基于改进自适应卡尔曼滤波算法的温室 UWB 定位技术[J]. 农业机械学报,2025,56(3):494 – 502,522.
ZHANG Zhaoguo, ZHU Shiliang, WANG Faan, et al. UWB greenhouse positioning technology based on improved adaptive Kalman filter algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 494 – 502, 522. (in Chinese)

(上接第 11 页)

[25] 张银平, 郝泽华, 徐婷, 等. 玉米免耕播种机动力补偿自适应清秸装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025,56(1):174 – 185.
ZHANG Yinping, HAO Zehua, XU Ting, et al. Design and experiment of dynamic compensation adaptive straw removal device for corn no-till seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 174 – 185. (in Chinese)
[26] 王金峰, 张鑫, 唐汉, 等. 水稻秸秆反旋深埋滑切还田刀优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(11):28 – 39.
WANG Jinfeng, ZHANG Xin, TANG Han, et al. Optimal design and experiment of deep-buried reverse rotating sliding cutting straw returning blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 28 – 39. (in Chinese)
[27] 廖庆喜, 谢昊明, 张青松, 等. 驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(7):99 – 110,195.
LIAO Qingxi, XIE Haoming, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 99 – 110, 195. (in Chinese)
[28] 刘芳建, 米义, 廖娜, 等. 立式旋耕机的研究设计与试验[J]. 农机化研究, 2017,39(11):81 – 84.
LIU Fangjian, MI Yi, LIAO Na, et al. Research design of vertical rotary cultivator and experiment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11): 81 – 84. (in Chinese)
[29] 扈伟昊. 基于离散元法的立式旋耕作业分析与关键部件参数优化[D]. 青岛:青岛理工大学,2023.
HU Weihao. Operation analysis of vertical rotary tiliage and rarameter optimization of key components based on discrete element method[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2023. (in Chinese)
[30] VARANI M, MATTETTI M, MOLARI G, et al. Correlation between power harrow energy demand and tilled soil aggregate dimensions[J]. Biosystems Engineering, 2023, 225: 54 – 68.
[31] 杨庆璐, 律政文, 闫银发, 等. 桑园立式旋转动力耙优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025,56(1):210 – 220.
YANG Qinglu, LÜ Zhengwen, YAN Yinfa, et al. Optimization design and experiment of vertical rotary harrow for mulberry plantation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 210 – 220. (in Chinese)
[32] 中国国家标准化管理委员会. 免(少)耕施肥播种机:GB/T 20865—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
[33] 农业农村部. 玉米免耕播种机作业质量:NY/T 1628—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
[34] 夏晓蒙. 高速免耕精密播种机清秸装置及播深控制技术研究[D]. 长春:吉林大学,2024.
XIA Xiaomeng. Research on row cleaning mechanism and sowing depth control technology of high-speed no-tillage precision planter[D]. Changchun: Jilin University, 2024. (in Chinese)