

垄作免耕播种机被动式防缠绕破茬清垄装置设计与试验

林 静¹ 吕洲翼¹ 李宏哲² 王鑫宇¹ 王东锐¹

(1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866; 2. 铁岭县现代农业发展服务中心, 铁岭 112600)

摘要: 为了解决东北玉米垄作免耕播种机作业时缠绕堵塞工作部件,减小对土壤扰动,提高破茬开沟质量等问题,优化设计了防缠绕破茬清垄装置,主要包括阿基米德螺线锯齿型缺口圆盘破茬刀和星型清垄轮。通过理论分析确定了影响破茬清垄装置作业性能的主要参数为机具前进速度 V_m 、破茬刀入土深度 h 以及清垄轮安装偏置角 α 。利用离散元软件 EDEM 进行二次回归正交旋转组合仿真试验,确定了该装置的最优工作参数组合为:机具前进速度 V_m 为 7 km/h、破茬刀入土深度 h 为 75 mm、清垄轮安装偏置角 α 为 30°。通过田间验证试验,得出破茬清垄装置在最优工作参数组合下的破茬率为 92.21%,清秸率为 93.49%,验证了仿真实验研究结果,机具通过性显著提高,达到了东北玉米垄作免耕播种农艺和农机的技术要求。

关键词: 免耕播种机; 破茬清垄装置; 防缠绕; 阿基米德螺线; 离散元

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)06-0019-09 OSID: 

Design and Experiment of Passive Anti-winding Stubble Breaking and Ridge Cleaning Device for No-tillage Planter

LIN Jing¹ LÜ Zhouyi¹ LI Hongzhe² WANG Xinyu¹ WANG Dongrui¹

(1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2. Tieling County Modern Agricultural Development Service Center, Tieling 112600, China)

Abstract: Currently, during the no-tillage planting operation of corn ridge in Northeast China, there are issues such as entanglement and blockage of working parts, soil disturbance reduction, and improvement of stubble breaking and ditching quality. To address these issues, the anti-winding stubble breaking and clearing device was optimized, consisting of the Archimedes spiral serrated notch disc stubble cutter and star ridge cleaning wheel. Through theoretical analysis, the main parameters affecting the performance of the stubble clearing and ridge cleaning device were identified as the tool forward speed, the depth of the stubble cutter in soil, and the offset angle of the ridge clearing wheel installation. To determine the optimal working parameters of the device, the second-order regression orthogonal rotation combination simulation experiment was conducted by using the discrete element software EDEM. Through this experiment, the optimal working parameter combination of the device was obtained, which included a tool forward speed of 7 km/h, a stubble cutter depth of 75 mm, and a ridge clearing wheel installation offset angle of 30°. Field experiments were conducted to verify the optimal parameter combination, and the results indicated that the stubble breaking rate of the Archimedes spiral sawtooth notch disc stubble breaker was 92.21% and the stubble clearing rate was 93.49%, which significantly improved the trafficability of machines and tools. The simulation theory results were verified by field experiments, meeting the technical requirements for the integration of ridge planting and no-tillage sowing agronomy and agricultural machinery in Northeast China.

Key words: no-till planter; stubble breaking and ridge clearing device; anti-winding; Archimedes spiral; discrete element method

0 引言

免耕播种机需要在有秸秆覆盖的地表完成播种作业,故有效防堵防缠绕是顺利实施免耕播种的前提^[1]。近年来,国内外学者围绕免耕播种机如何高效切茬、清秸、防堵进行了大量研究^[2-13]。目前,驱动式防堵装置具有较好的防堵效果^[14-16],但是其土壤扰动较大,播种时会破坏原垄,形成新沟,从而丧失了垄作模式的优点。被动式防堵装置土壤扰动小^[17-19],但在秸秆覆盖量大的情况下作业效果不佳,无法满足玉米垄作免耕播种的技术要求^[20]。

针对上述问题,本文以自主研制的阿基米德螺旋线锯齿型缺口圆盘破茬刀为基础,优化设计一种被动式防缠绕破茬清垄装置,同时实现破茬和清垄的功能。并通过理论分析、仿真研究和田间试验确定破茬清垄装置的最佳结构参数。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

玉米免耕播种机防缠绕破茬清垄装置如图 1 所示,由阿基米德螺旋线锯齿型缺口圆盘破茬刀、星型清垄轮、弹簧等组成。其中星型清垄轮与机具前进方向呈一定夹角偏置安装,使清垄轮兼具向后拨动和侧推秸秆的作用。

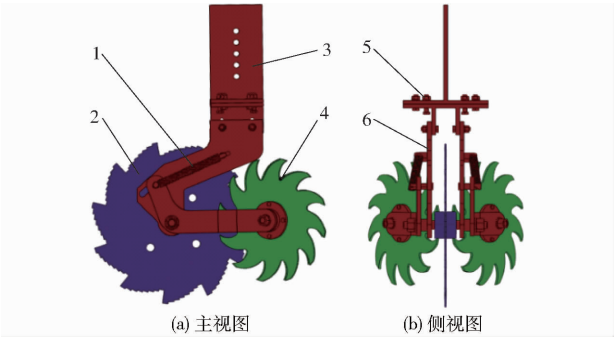


图 1 防缠绕破茬清垄装置结构示意图

Fig.1 Schematics of anti-winding stubble breaking and ridge clearing device

1. 弹簧 2. 阿基米德螺旋线锯齿型缺口圆盘破茬刀 3. 高度调节装置 4. 星型清垄轮 5. 固定板 6. 支撑板

1.2 工作原理

该装置在拖拉机带动及土壤摩擦力的作用下滚动旋转,兼有无支撑和有支撑两种切割方式。当破茬刀底部与垄上秸秆接触时,破茬刀刃口上的锯齿嵌住秸秆进行无支撑切割;当破茬刀与垄上根茬接触时,玉米根茬固定在土壤里,被刀刃切割时不会产生移动,进行有支撑切割,破开玉米根茬的根上节(俗称“五叉股”)。被切碎的秸秆与破开的根茬会在清垄轮的作用下,被侧推至两侧的垄沟中,从而实

现防堵防缠绕功能,增加了机具的通过性,并在垄上提供了清洁的播种区域,为免耕播种种床创造良好的条件,保证了播种质量。

2 关键部件设计

2.1 破茬刀结构设计

2.1.1 刃口曲线设计

破茬刀的刃口曲线形状设计为阿基米德螺旋线锯齿型刀刃缺口,优点是:动滑切角随着刃口的切入至切出越来越大,滑切效果好;对于地表以下的根茬可以渐进式破茬入土,入土效果好,破茬率显著提高^[21]。

阿基米德螺旋线如图 2 所示, A 为破茬刀刃口曲线局部放大视图, L 为与起始位置夹角每增大 θ_1 时半径增加的长度,刃口曲线为阿基米德螺旋线,其坐标方程为

$$\begin{cases} x = (R_0 + k\theta) \cos\theta \\ y = (R_0 + k\theta) \sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中 R_0 ——起始半径,mm
 k ——常数
 θ ——当前位置与原点连线和初始半径位置之间的夹角, ($^\circ$)

由此可得破茬刀的最大半径 $R_{\max}$ 计算公式为

$$R_{\max} = R_0 + k\varphi \quad (2)$$

式中 φ ——缺口包角, ($^\circ$)

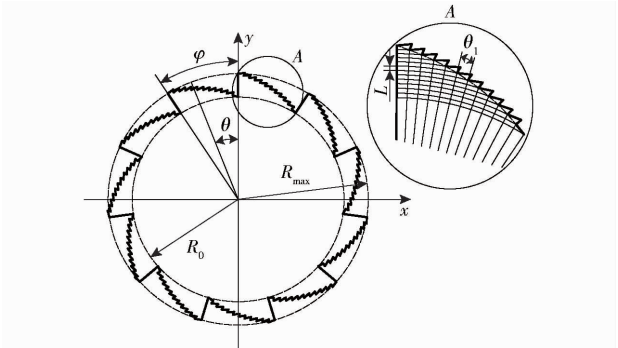


图 2 阿基米德螺旋线锯齿型缺口圆盘破茬刀结构示意图

Fig.2 Schematic of Archimedes spiral serrated notch disc stubble cutter

2.1.2 破茬刀结构参数设计

设阿基米德螺旋线锯齿型缺口圆盘破茬刀置于坐标系 xOy 中,其中心点与坐标系原点 O 重合, x 轴水平向右为正方向, y 轴竖直向上为正方向,令第 1 个缺口的起始半径方向与 y 轴正方向重合,各缺口以 y 轴正方向开始逆时针依次编号,以此建立刃口曲线的参数方程为

$$\begin{cases} x = - \left\{ R_0 + k \left[\theta - (n-1) \frac{360}{Z} \right] \right\} \sin\theta \\ y = \left\{ R_0 + k \left[\theta - (n-1) \frac{360}{Z} \right] \right\} \cos\theta \end{cases} \quad (3)$$

式中 Z ——破茬刀的缺口数

根据现有研究^[22],玉米根茬的根上节深度平均为 70 mm,为了能够完全破开玉米根茬的根上节,确定破茬刀结构参数为缺口数 11,最大半径 215 mm,起始半径 175 mm,包角 32.72°。并且由于锯齿形刀片在切割秸秆的过程中,受到的合力较小,受力比较均匀,切割效率高,切割效果好^[23-24]。因此,参考《农业机械设计手册》^[25],在刃口曲线上加工出齿高为 5 mm、齿宽为 10 mm 的锯齿,以此增加破茬刀的滑切效果与切茬能力,从而实现破茬刀的防缠绕防堵功能。

2.2 破茬刀运动分析

2.2.1 破茬刀运动轨迹分析

阿基米德螺线锯齿型缺口圆盘破茬刀的同一个缺口刃上不同点具有不同的运动轨迹。其运动轨迹与机具前进速度 V_m 、破茬刀旋转角速度 ω 有关。而破茬刀转动一周所需要的时间 T 与机具前进速度 V_m 、破茬刀最大半径 $R_{\max}$ 和起始半径 R_0 相关^[21],其转动一周所需的时间 T 为

$$T = \frac{(R_{\max} - R_0) \pi}{V_m} \tag{4}$$

由此可得破茬刀旋转角速度为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2V_m}{R_{\max} - R_0} \tag{5}$$

根据刃口曲线的参数方程、机具前进速度以及破茬刀旋转角速度,即可得到破茬刀在工作时的运动轨迹,其运动轨迹的参数方程为

$$\begin{cases} x = - \left\{ R_0 + k \left[\theta - (n-1) \frac{360}{Z} \right] \right\} \sin(\theta - \omega t) + V_m t \\ y = \left\{ R_0 + k \left[\theta - (n-1) \frac{360}{Z} \right] \right\} \cos(\theta - \omega t) \end{cases} \tag{6}$$

式中 t ——破茬刀工作时间, s

选取第 1 个缺口处的刃口运动轨迹作为研究对象,设最大半径处为点 A、 θ 为 $\varphi/2$ 处为点 B、起始半径处为点 C,当机具前进速度 V_m 为 5 km/h 时,其运动轨迹如图 3 所示。其中点 A 的运动轨迹为余摆线,点 B 与点 C 完成切割后会迅速抬升,不会出现

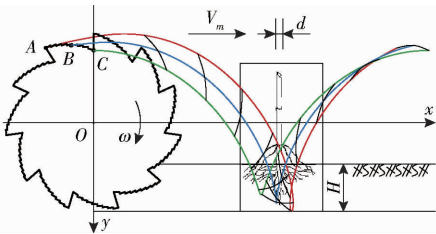


图 3 破茬刀同一刃线上不同点的运动轨迹
Fig. 3 Movement track of different points on the same cutting edge line of stubble cutter

出土时向后抛土的现象,可以有效减少对土壤的扰动,并且快速抬升可以将破茬刀上附着的残茬与土壤甩掉,减少带土和缠绕。

2.2.2 破茬刀入土时动滑切角分析

在破茬刀切茬过程中动滑切角会影响切茬效果^[26],因此对破茬刀切茬过程中的动滑切角进行分析研究。如图 4 所示,选取破茬刀第 1 个缺口处的刀刃入土任意一点 P 进行速度分析,以破茬刀中心点为坐标原点 O,水平向右为 x 轴正方向,竖直向下为 y 轴正方向建立 xOy 坐标系。此时该刀刃的刃口曲线参数方程为

$$\begin{cases} x = - (R_0 + k\theta) \sin(\theta - \omega t) \\ y = (R_0 + k\theta) \cos(\theta - \omega t) \end{cases} \tag{7}$$

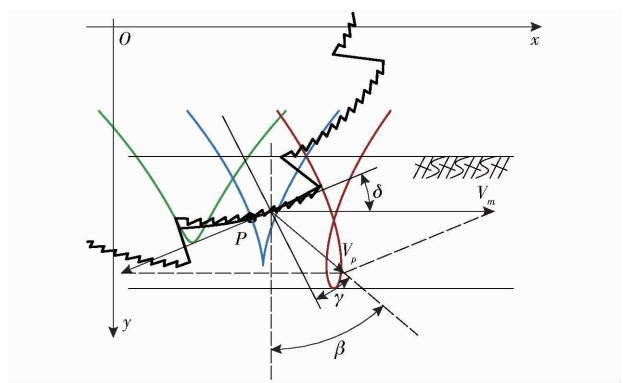


图 4 破茬刀刃口曲线上点 P 速度分析
Fig. 4 Velocity analysis of point P on curve of stubble cutting edge

且清垄轮主偏角 δ 为刃口曲线在点 P 处的切线与水平方向的夹角,由此可得出清垄轮主偏角 δ 的计算公式为

$$\delta = \arctan \frac{y}{x} \tag{8}$$

将式(7)代入式(8)可得清垄轮主偏角 δ 的计算公式为

$$\delta = \arctan \left(- \frac{1}{\tan(\theta - \omega t)} \right) \tag{9}$$

对点 P 的速度分析计算公式为

$$\begin{cases} V_1 = (R_0 + k\theta) \omega \\ V_x = V_m - \omega (R_0 + k\theta) \cos\delta \\ V_y = \omega (R_0 + k\theta) \sin\delta \\ V_p = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \end{cases} \tag{10}$$

式中 V_1 ——点 P 线速度, km/h
 V_x ——点 P 水平方向上速度, km/h
 V_y ——点 P 竖直方向上速度, km/h
 V_p ——点 P 合速度, km/h

由式(7)、(8)可得点 P 的速度方向角 β 计算公式为

$$\beta = \arctan \frac{\omega(R_0 + k\theta) \cos \left(\arctan \left(-\frac{1}{\tan(\theta - \omega t)} \right) \right) + V_m}{\omega(R_0 + k\theta) \sin \left(\arctan \left(-\frac{1}{\tan(\theta - \omega t)} \right) \right)}$$

(11)

滑切角 γ 计算公式为

$$\gamma = \beta - \delta$$

(12)

将式(9)、(11)代入式(12),即可得到在前进速度固定的情况下,刃口曲线上点A、B、C在入土切茬时滑切角随时间的变化关系。同时根据式(6)的运动轨迹方程,可以得到在前进速度固定的情况下,刃口曲线上点A、B、C的入土深度与时间的关系。由此即可得到,当机具前进速度 V_m 为 5 km/h 时,刃口曲线上点A、B、C在入土切茬时滑切角与入土深度的关系,如图5所示。由图中曲线可知刃口处的动滑切角随着刃口的切入越来越大,由此可以避免出现常规缺口圆盘的漏切问题。同时可以明确地观察到,破茬刀刃口处的滑切角随着该点处半径的增大在逐渐减小,这有利于使未被切断的根茬在压入土后最终被切断,以提高破茬刀的切茬与防缠绕效果。

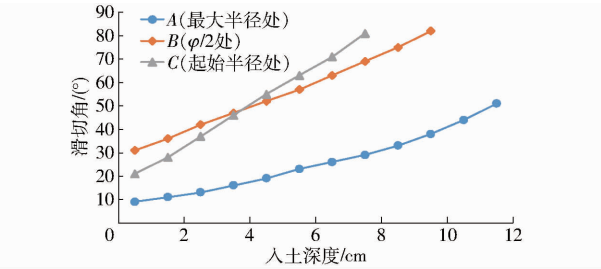


图5 破茬刀刃口滑切角与入土深度关系曲线
Fig.5 Curves of sliding cutting angle of stubble cutting edge and buried depth

2.3 清垄轮设计

2.3.1 清垄轮结构设计

清垄轮齿形设计为螺旋线形的星型结构,其特点是刀刃每旋转单位角度,其径向切入土壤中的长度是相同的,因此刀刃切土时负荷变化比较均匀。且清垄轮的主要目的是为了清除垄上的杂草与秸秆,减少杂草等对其的缠绕,因此清垄过程中需要有一定的滑切角^[25]。设计时齿形对 θ 取 4/5 次方,以此确定的齿形在相同位置,具有更小的曲率半径和更大的滑切角,其齿形曲线方程的极坐标方程为

$$R = R_0 + k\theta^{\frac{4}{5}}$$

(13)

式中 R ——极径,mm

根据现有研究^[22],选取清垄轮最大半径为 165 mm,起始半径为 115 mm,缺口数为 12。其齿形曲线如图6所示。

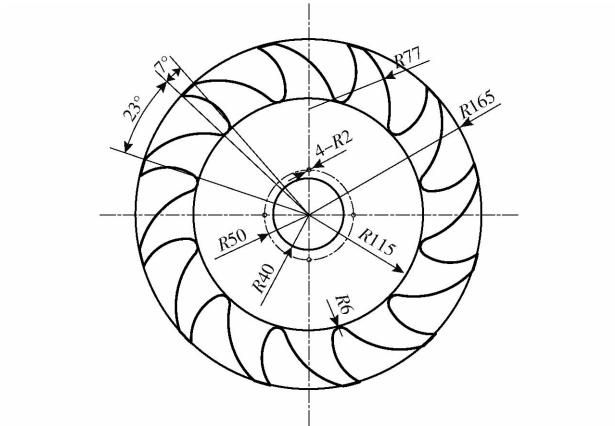


图6 清垄轮齿形结构图
Fig.6 Ridge cleaning cutter tooth structure diagram

2.3.2 清垄轮运动分析

清垄轮在清除垄上杂草与秸秆的过程中,会对秸秆等进行推移与抛撒,如图7a所示。而秸秆的覆盖情况会影响耕地径流量与土壤侵蚀量^[27],因此对杂草与秸秆的抛撒规律进行研究。对清垄轮将要抛撒出的秸秆进行速度分析,令机具前进方向为 x 轴正方向,水平方向上与 x 轴呈 90° 夹角向外为 y 轴正方向,竖直向上为 z 轴正方向,如图7b所示。

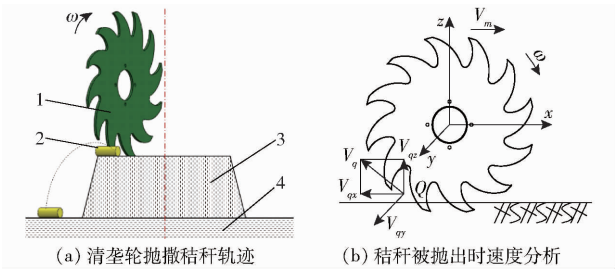


图7 清垄轮抛撒秸秆运动分析
Fig.7 Movement analysis of straw throwing by ridge clearing wheel

1. 清垄轮 2. 秸秆 3. 垄台 4. 耕层

设点 Q 为秸秆被抛撒出去的临界点,秸秆的抛撒方向为清垄轮的侧后方,与机具前进方向的夹角为清垄轮偏置角 α 。并假设将秸秆视为一个质点,忽略空气阻力与秸秆之间的碰撞,可以得到秸秆离开清垄轮之后的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} X = -\sqrt{2RH_1 + H_1^2} \cos \alpha - tR\omega \sin \beta_Q \cos \alpha \\ Y = \sqrt{2RH_1 + H_1^2} \sin \alpha + tR\omega \sin \beta_Q \sin \alpha \\ Z = H_1 - R + tR\omega \sin \beta_Q \end{cases}$$

(14)

式中 H_1 ——清垄轮入土深度,mm
 β_Q ——秸秆在点 Q 处抛撒方向与水平方向夹角, (°)

在初始速度不变的情况下,当抛射角 β_Q 为 $\pi/4$ 时,抛撒的距离最远,根据公式(14)可得秸秆抛撒的最远距离 L_y 为

$$L_y = \sqrt{2RH_1 + H_1^2} \sin\alpha + \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{\sqrt{2}R\omega}{2g} + \sqrt{\frac{2H + \frac{R\omega^2}{2g}}{g}} \right) R\omega \sin\alpha \quad (15)$$

式中 H ——垄高,mm
 g ——重力加速度,m/s²

当垄高为 130 mm,清垄轮入土深度为 20 mm 时,取偏置角 20°~50°进行研究^[22]。根据式(15)可得,秸秆在 y 方向上被抛撒的最远距离随清垄偏置角 α 的增大呈先增大后减小的趋势,当偏置角为 43°时秸秆抛撒达到最远距离。当偏置角较小时,抛撒距离过近,会导致在秸秆杂草量较大的区域作业时有可能发生堵塞。但随着偏置角不断增大,清垄轮受到的阻力也会不断增大。因此选择适中的偏置角为 25°~35°。

清垄轮清垄宽度 b 计算公式为

$$b = 2\sin\alpha \sqrt{R^2 - (R - H_1)^2} = 2\sin\alpha \sqrt{2RH_1 - H_1^2} \quad (16)$$

将偏置角 α 为 25°~35°代入式(16)中可得,清垄轮的清垄宽度 b 为 67~90 mm,达到了免耕播种清垄的农业技术要求^[28]。

3 仿真

对防缠绕破茬清垄装置进行 3D 建模,再通过离散元仿真软件 EDEM 建立破茬清垄装置-土壤-根茬-秸秆间的相互作用模型。对破茬清垄装置作业过程进行仿真模拟,以机具工作时的前进速度 V_m 、破茬刀入土深度 h 、清垄轮安装偏置角 α 为试验因素,以破茬率和清秸率为主要评价指标,设计二次回归正交旋转组合试验,分析影响破茬清垄装置作业性能的主要因素,以寻求最优的结构参数组合,为田间试验提供理论参考。

3.1 仿真建模

实际作业过程中,破茬刀与清垄轮为主要作业部件,因此对破茬清垄装置进行简化处理,去除仿真过程中无关部件后导入 EDEM 软件中,设置仿真模型的材料为 65Mn 钢,泊松比为 0.3,剪切模量为 7.0×10^{10} Pa,密度为 7 800 kg/m³。选择 Hertz - Mindlin with no slip 模型作为土壤颗粒间接触模型^[29-30],其中土壤模型由直径 3 mm 的球形颗粒表示,垄台尺寸为垄顶宽 250 mm、垄底宽 260 mm、垄台高 135 mm、垄长 4 300 mm,泊松比为 0.38,剪切模量为 1×10^6 Pa,密度为 2 650 kg/m³。

根据实地测量,地表覆盖秸秆的尺寸为平均直径 15 mm、长 80~110 mm。选择 Hertz - Mindlin with

Bonding 模型作为根茬颗粒间接触模型^[31]。采用由直径 15 mm、粘结半径 5 mm 的球形颗粒组成长度为 80、90、100、110 mm 的长线性模型作为秸秆颗粒模型,秸秆覆盖量设定为 1.3 kg/m²。秸秆泊松比为 0.3,剪切模量为 1×10^6 Pa,密度为 240 kg/m³。

根茬尺寸为直径 25 mm、高 170 mm、根上节长度 70 mm,主须直径 2 mm、长 100 mm,须根直径 1 mm、长 20 mm,如图 8 所示。通过 SolidWorks 构建根茬的空心模型,再导入到 EDEM 中,模型内部填充根茬颗粒。选择 Hertz - Mindlin with Bonding 模型作为根茬颗粒间接触模型,颗粒选择半径为 1.5 mm 的标准球形颗粒,粘结半径为 1.7 mm。根茬颗粒与土壤颗粒之间的接触模型选 JKR 模型^[32],土壤根茬表面能为 10 J/m²,泊松比为 0.3,剪切模量为 6.6×10^6 Pa,密度为 860 kg/m³。

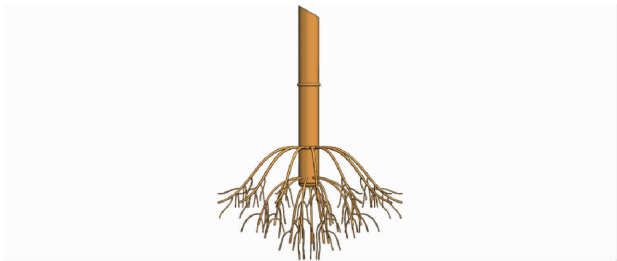


图 8 根茬模型

Fig.8 Corn rootstalk model

根茬排布情况为每 5 个根茬为一组,1 号根茬中心位于中心线上,2 号与 3 号根茬分别位于中心线两侧 10 mm 处,4 号与 5 号根茬分别位于中心线两侧 5 mm 处,株距为 200 mm,每组试验排布 2 组根茬,如图 9a 所示。仿真过程如图 9 所示,仿真材料间的接触参数如表 1 所示^[33-36]。

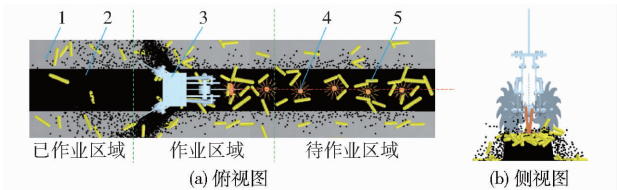


图 9 仿真过程

Fig.9 Simulation process

1. 垄沟 2. 垄台 3. 破茬清垄装置 4. 根茬 5. 秸秆

3.2 仿真试验设计

为深入研究破茬清垄装置的作业效果,根据理论分析结果,确定以机具工作时前进速度 V_m 、破茬刀入土深度 h 、清垄轮安装偏置角 α 为试验因素,以破茬率和清秸率为试验评价指标,采用二次回归正交旋转组合试验方法,确定该防缠绕破茬清垄装置的最优参数组合,试验因素编码如表 2 所示。

表 1 仿真材料接触参数

Tab.1 Material contact parameters for simulation			
参数	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
土壤-土壤	0.6	0.35	0.17
土壤-65Mn 钢	0.6	0.6	0.3
土壤-秸秆	0.5	0.3	0.05
土壤-根茬	0.5	0.3	0.06
秸秆-秸秆	0.3	0.65	0.06
秸秆-65Mn 钢	0.3	0.3	0.01
秸秆-根茬	0.3	0.3	0.06
根茬-根茬	0.3	0.3	0.06
根茬-65Mn 钢	0.3	0.3	0.01

表 2 试验因素编码

Tab.2 Test factors and coding			
编码	因素		
	作业速度	入土深度	偏置角
	$x_1/(km\cdot h^{-1})$	x_2/mm	$x_3/(^{\circ})$
1.682	8.68	91.82	38.41
1	8	85	35
0	7	75	30
-1	6	65	25
-1.682	5.32	58.18	21.59

试验指标参考 GB/T 20865—2017《免(少)耕施肥播种机》,结合实际玉米免耕播种作业要求,选择破茬率与清秸率为试验指标。选择垄上作业区域为测量区域。

3.3 仿真试验结果与分析

二次回归正交旋转组合试验方案与结果如表 3 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。分别对破茬率与清秸率进行方差分析。

破茬率方差分析如表 4 所示,整体模型极显著 ($P<0.01$),因子 X_1^2 、 X_2^2 极显著 ($P<0.01$), X_1 、 X_2 显著 ($P<0.05$)。各因素的显著性从大到小依次为:机具前进速度 X_1 、破茬刀入土深度 X_2 、清垄轮安装偏置角 X_3 。剔除不显著交互项后破茬率 Y_1 的回归方程为

$$Y_1=92.46+0.49X_1+0.47X_2-1.94X_1^2-1.77X_2^2$$

(17)

清秸率方差分析如表 5 所示,整体模型极显著 ($P<0.01$),因子 X_1^2 、 X_3^2 极显著 ($P<0.01$), X_1 、 X_3 显著 ($P<0.05$)。各因素的显著性从大到小依次为:机具前进速度 X_1 、清垄轮安装偏置角 X_3 、破茬刀入土深度 X_2 。剔除不显著交互项后清秸率 Y_2 的回归方程为

$$Y_2=93.94+0.21X_1+0.2X_3-1.33X_1^2-1.46X_3^2$$

(18)

表 3 试验方案与试验结果

Tab.3 Test plan and experimental result					
试验 序号	因素			破茬率	清秸率
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	-1	-1	-1	87.00	90.87
2	1	-1	-1	88.00	91.69
3	-1	1	-1	88.00	90.33
4	1	1	-1	89.00	91.34
5	-1	-1	1	88.00	91.25
6	1	-1	1	89.00	91.22
7	-1	1	1	88.00	91.87
8	1	1	1	90.00	91.89
9	-1.682	0	0	87.00	89.62
10	1.682	0	0	88.00	90.25
11	0	-1.682	0	87.00	93.64
12	0	1.682	0	89.00	93.55
13	0	0	-1.682	93.00	89.33
14	0	0	1.682	92.00	89.79
15	0	0	0	92.00	93.68
16	0	0	0	93.00	93.83
17	0	0	0	93.00	94.02
18	0	0	0	93.00	93.62
19	0	0	0	92.00	94.44
20	0	0	0	93.00	94.12
21	0	0	0	92.00	93.89
22	0	0	0	93.00	93.78
23	0	0	0	92.00	94.34

表 4 破茬率方差分析

Tab.4 Variance analysis of stubble breaking rate					
方差来源	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	116.21	9	12.91	26.99	<0.001
X_1	3.27	1	3.27	6.83	0.021
X_2	2.97	1	2.97	6.20	0.027
X_3	0.13	1	0.13	0.27	0.615
X_1X_2	0.13	1	0.13	0.26	0.618
X_1X_3	0.13	1	0.13	0.26	0.619
X_2X_3	0.13	1	0.13	0.26	0.620
X_1^2	60.15	1	60.15	125.70	<0.001
X_2^2	49.71	1	49.71	103.89	<0.001
X_3^2	0.50	1	0.50	1.050	0.324
失拟项	4.00	5	0.80	2.88	0.089
纯误差	2.22	8	0.28		
总和	122.43	22			

3.4 参数优化

为了得到破茬清垄装置的最优工作参数组合,采用多目标变量优化方法,对影响破茬率和清秸率的各个试验因素进行优化设计,遵循提高破茬率和清秸率的原则,结合各试验因素的边界条件,建立参数目标函数为

表 5 清秸率方差分析

Tab.5 Variance analysis of straw removal rate

方差来源	平方和	自由度	均方和	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	64.03	9	7.11	66.77	<0.001
<i>X</i> ₁	0.61	1	0.61	5.70	0.033
<i>X</i> ₂	0.01	1	0.01	0.04	0.840
<i>X</i> ₃	0.56	1	0.56	5.29	0.039
<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	0.01	1	0.01	0.07	0.799
<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	0.42	1	0.42	3.97	0.068
<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	0.59	1	0.59	5.58	0.035
<i>X</i> ₁ ²	28.18	1	28.18	264.45	<0.001
<i>X</i> ₂ ²	0.02	1	0.02	0.21	0.653
<i>X</i> ₃ ²	34.07	1	34.07	319.73	<0.001
失拟项	0.73	5	0.15	1.80	0.22
纯误差	0.65	8	0.08		
总和	65.41	22			

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \max Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 5.32 \text{ km/h} \leq x_1 \leq 8.68 \text{ km/h} \\ 58.18 \text{ mm} \leq x_2 \leq 91.82 \text{ mm} \\ 21.59^\circ \leq x_3 \leq 38.41^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

基于 Design-Expert 对目标函数中的参数进行优化求解,结合实际作业要求,得到最优参数组合为:机具前进速度 7 km/h、破茬刀入土深度 75 mm、清垄轮安装偏置角 30°,此时装置的破茬率为 92.46%,清秸率为 93.96%。

4 田间试验

4.1 试验条件

为验证防缠绕破茬清垄装置在田间作业时的工作性能,于 2021 年 4 月在沈阳农业大学试验田进行田间试验,如图 10 所示。玉米根茬平均高度为 17.5 cm,平均直径为 2.6 cm,平均含水率为 15.4%。玉米秸秆长度为 5~15 cm,秸秆覆盖量为 1.39 kg/m²,平均含水率为 17.2%。试验田土壤类型为棕壤土,地表土壤紧实度 119 kPa,5 cm 处为 351 kPa,10 cm 处为 479 kPa,15 cm 处为 960 kPa。0~10 cm 处土壤含水率为 12.2%,10~20 cm 处为 14.5%。5 cm 处土壤温度为 15.2℃,10 cm 处为 12.6℃,15 cm 处为 11.5℃。配套动力为东方红-30 型拖拉机。机具前进速度为 7 km/h,破茬刀入土深度为 75 mm,清垄轮安装偏置角为 30°。

4.2 试验方法

(1) 机具通过性

田间试验过程中根据 NY/T 1768—2009《免耕播种机 质量评价技术规范》及农业农村部农机鉴定推广总站免耕播种机性能检测要求对播种机通过性



图 10 田间试验

Fig.10 Field experiment

进行测试。测试长度为 60 m,观察作业过程中机具被根茬、秸秆缠绕堵塞情况。

(2) 破茬率

采用五点取样法对稳定作业区域进行取点,对每个采样点相同面积区域内作业前后的垄上根茬数量进行计数,得到初始根茬数量与作业后根茬数量,计算得出平均破茬率 *Y*₃。

(3) 清秸率

采用五点取样法对稳定作业区域进行取点,使用电子秤对每个采样点相同面积区域内作业前后的全部秸秆分别进行称量,得到初始秸秆质量与作业后秸秆质量,计算得出平均清秸率 *Y*₄。

4.3 试验结果

经过 5 次有效田间试验,测得试验结果取平均值。试验结果表明,安装有防缠绕破茬清垄装置的免耕播种机未发生秸秆壅堵及缠绕情况,机具通过性良好,平均破茬率 *Y*₃ 为 92.21%,平均清秸率 *Y*₄ 为 93.49%,验证了仿真实验研究结果。田间试验表明,机具具有良好的通过性,破茬率、清秸率等作业性能质量指标满足东北玉米垄作免耕播种作业农艺和技术要求。

5 结论

(1) 优化设计了一种适合东北玉米垄作模式的防缠绕破茬清垄装置,该装置通过阿基米德螺旋锯齿型缺口圆盘破茬刀对秸秆与根茬进行切割,通过清垄轮将垄台上的残茬与秸秆侧推进垄沟,有效提高了破茬率与清秸率,达到了防缠绕防堵的功能,可为免耕播种机的关键部件优化设计提供理论依据。

(2) 通过对破茬清垄装置运动分析,得到影响破茬清垄装置作业性能的主要参数为机具前进速度 *V_m*、破茬刀入土深度 *h* 以及清垄轮安装偏置角 *α*。其主要结构参数的取值范围为 25°≤*α*≤35°,清垄轮的清垄宽度 *b* 为 67~90 mm。

(3) 通过离散元软件 EDEM 进行仿真试验分析,设计二次回归正交旋转试验对破茬清垄装置进行了参数优化。得到防缠绕破茬清垄装置各因素对

破茬率影响显著顺序为:机具前进速度 V_m 、破茬刀入土深度 h 、清垄轮安装偏置角 α 。各因素对清秸率影响显著顺序为:机具前进速度 V_m 、清垄轮安装偏置角 α 、破茬刀入土深度 h 。得到的最佳组合参数为:机具前进速度 V_m 为 7 km/h、破茬刀入土深度 h 为 75 mm、清垄轮安装偏置角 α 为 30°。

(4)对仿真试验得到的最佳组合参数进行田间验证试验。田间验证表明在秸秆覆盖量为 1.39 kg/m² 的情况下,机具前进速度为 7 km/h 时,破茬率为 92.21%,清秸率为 93.49%,达到了防缠绕防堵的功能,机具通过性显著提高,满足东北玉米垄作免耕播种作业农艺和农机技术要求。

参 考 文 献

[1] 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 progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(4):1-19. (in Chinese)

[2] 张振国,郭全峰,何进,等.小麦免耕播种机双导轨滑移式调偏系统设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(12):59-69.
ZHANG Zhenguo, GUO Quanfeng, HE Jin, et al. Design and experiment of double-guide sliding deflection system for no-till wheat seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(12):59-69. (in Chinese)

[3] 陈海涛,邹震,王星,等.免耕播种机侧向清秸覆秸秸秆比例回收装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(4):120-129.
CHEN Haitao, ZOU Zhen, WANG Xing, et al. Design and experiment of straw proportional recovery device for clearing and covering straw of no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(4):120-129. (in Chinese)

[4] 王加一,赵淑红,高连龙,等.玉米垄作随动自调刃口角被动圆盘式破茬刀设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(11):59-67.
WANG Jiayi, ZHAO Shuhong, GAO Lianlong, et al. Design and experiment of passive disc cutting blade in cornridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(11):59-67. (in Chinese)

[5] 王奇,唐汉,周文琪,等.幅宽自动控制清秸防堵装置设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(3):25-35.
WANG Qi, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Design and experiment of automatic width control row cleaners[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(3):25-35. (in Chinese)

[6] 王庆杰,曹鑫鹏,王超,等.东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究进展[J].农业机械学报,2021,52(10):1-15.
WANG Qingjie, CAO Xinpeng, WANG Chao, et al. Research progress of no/minimum tillage corn seeding technology and machine in northeast black land of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(10):1-15. (in Chinese)

[7] 姚文燕,赵殿报,徐广飞,等.条带对行主动式玉米免耕播种防堵装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(增刊2):55-62,71.
YAO Wenyan, ZHAO Dianbao, XU Guangfei, et al. Design and experiment of anti-blocking device for strip to row active corn no-tillage seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp. 2):55-62,71. (in Chinese)

[8] SHARMA V K. Design, development and performance evaluation of a multi-toolbar no-till seed drill for surface managed loose straw conditions after combining[D]. Pantnagar: G B Pant University of Agriculture and Technology, 2014.

[9] 黄玉祥,高鹏洋,张庆凯,等.免耕播种机切茬杂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)

[10] 王奇,贾洪雷,朱龙图,等.免耕播种机星齿凹面盘式清秸防堵装置设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(2):68-77.
WANG Qi, JIA Honglei, ZHU Longtu, et al. Design and experiment of star-toothed concave disk row cleaners for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(2):68-77. (in Chinese)

[11] 姚文燕,赵殿报,苗河泉,等.免耕播种机浅旋清茬斜置式防堵装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(8):42-52.
YAO Wenyan, ZHAO Dianbao, MIAO Hequan, et al. Design and experiment of oblique anti-blocking device for no-tillage planter with shallow plowing stubble clearing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(8):42-52. (in Chinese)

[12] 赵宏波,何进,郑智旗,等.少免耕播种机条带型行间侧抛清秸防堵装置研究[J].农业机械学报,2020,51(12):24-34.
ZHAO Hongbo, HE Jin, ZHENG Zhiqi, et al. Strip tillage inter-row residue side-throwing device of no/minimum-till seeder for anti-blocking and seedbed-cleaning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(12):24-34. (in Chinese)

[13] 陈海涛,侯磊,侯守印,等.大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置设计与优化试验[J].农业机械学报,2018,49(8):59-67.
CHEN Haitao, HOU Lei, HOU Shouyin, et al. Design and optimization experiment of anti-blocking mechanism of no-tillage

planter for grand ridge with raw corn stubble[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8):59-67. (in Chinese)

[14] 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)

[15] 袁盼盼,李洪文,蒋贵菊,等. 滴灌区宽窄行玉米免耕播种带秸秆清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):43-52. YUAN Panpan, LI Hongwen, JIANG Guiju, et al. Design and experiment of straw cleaning device for wide narrow maize no-tillage sowing strip in drip irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(6):43-52. (in Chinese)

[16] 曹鑫鹏,王庆杰,李洪文,等. 主动旋转集行式清秸装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(6):26-34. CAO Xinpeng, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and experiment of active rotating collective straw-cleaned[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(6):26-34. (in Chinese)

[17] 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 planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(Supp.):132-140. (in Chinese)

[18] DING S P, BAI L, YAO Y X, et al. Discrete element modelling (DEM) of fertilizer dual-banding with adjustable rates[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2018,152:32-39.

[19] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering,2014,121:105-117.

[20] 林静,赵德芳,胡艳清,等. 基于免耕播种的玉米根茬物理机械特性分析[J]. 农机化研究,2012,34(3):162-166. LIN Jing, ZHAO Defang, HU Yanqing, et al. Analysis on physical and mechanical characteristics of corn residue for no-till planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2012,34(3):162-166. (in Chinese)

[21] 林静,李宝筏,李宏哲. 阿基米德螺旋线型破茬开沟和切拨防堵装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(17):10-19. LIN Jing, LI Baofa, LI Hongzhe. Design and experiment of Archimedes spiral type stubble breaking ditching device and stubble breaking anti blocking device[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(17):10-19. (in Chinese)

[22] 林静,李博,李宝筏,等. 阿基米德螺旋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. Parameter optimization and experiment on Archimedes spiral type of gap cutting disc[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(6):118-124. (in Chinese)

[23] 李晓军,孙伟,张涛,等. 收获期马铃薯茎秧切割及杀秧刀片设计与试验[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(2):253-259. LI Xiaojun, SUN Wei, ZHANG Tao, et al. Design and test of potato haulm cutter at the harvest[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2019,37(2):253-259. (in Chinese)

[24] 郭茜,张西良,徐云峰,等. 基于 EDEM 的番茄秸秆切割性能仿真及试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(10):1017-1022. GUO Qian, ZHANG Xiliang, XU Yunfeng, et al. Simulation and experimental study on cutting performance of tomato cane straw based on EDEM[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2018,36(10):1017-1022. (in Chinese)

[25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.

[26] 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)

[27] 贺云锋. 黑土区坡耕地垄作和秸秆还田方式对土壤侵蚀的影响研究[D]. 长春:吉林农业大学,2021. HE Yunfeng. Effects of ridge tillage and straw returning on soil erosion at sloping croplands in the black soil region[D]. Changchun:Jilin Agricultural University,2021. (in Chinese)

[28] 林静,刘安东,李宝筏,等. 2BG-2 型玉米垄作免耕播种机[J]. 农业机械学报,2011,42(6):43-46,62. LIN Jing, LIU Andong, LI Baofa, et al. 2BG-2 type corn ridge planting no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(6):43-46,62. (in Chinese)

[29] PANDEY D, AGRAWAL M, BOHRA J. Effects of conventional tillage and no tillage permutations on extracellular soil enzymeactivities and microbial biomass under rice cultivation[J]. Soil and Tillage Research,2014,136:51-60.

[30] ZHANG Z, QIANG H, MCHUGH A, et al. Effect of conservation farming practices on soil organic matter and stratification in amono-cropping system of Northern China[J]. Soil and Tillage Research,2016,156:173-181.

[31] 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)