doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.005

免耕播种机浅旋清茬斜置式防堵装置设计与试验

姚文燕　赵殿报　苗河泉　崔培德　魏懋健　刁培松
(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

摘要: 针对黄淮海地区玉米免耕播种作业时,过量小麦秸秆残茬堵塞开沟器的问题,提出一种以拨离残茬和浅旋根茬形式实现苗床清整的斜置式防堵装置。通过理论分析对防堵装置结构参数进行设计,确定了各参数的范围和相互关系,并根据装置结构对耕刀拨茬入土和脱茬离土的过程进行受力分析,确定了影响工作性能的因素。运用离散元方法模拟防堵装置在田间作业过程,以秸秆清除率、土壤扰动系数和功耗为评价指标,对装置倾角、转速和前进速度进行回归分析和显著性检验,确定了各因素对评价指标的影响及主次顺序。通过对回归模型进行多目标函数优化求解,得到最优参数组合为:转速 400 r/min、前进速度 6 km/h、倾角 18.5°,此时秸秆清除率为 74.5%、土壤扰动系数为 34.7%、功耗为 1.36 kW。以优化得到的参数对装置进行土槽试验,试验结果表明:转速为 400 r/min、前进速度6 km/h、倾角 18.5°时,秸秆清除率为 92.5%、土壤扰动系数为 29.6%、功耗为 1.51 kW,试验结果与仿真试验优化结果相吻合,满足设计要求。

关键词: 免耕播种机; 浅旋清茬; 斜置防堵装置; EDEM 仿真; 土槽试验
中图分类号: S223.1+9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2022)08-0042-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Oblique Anti-blocking Device for No-tillage Planter with Shallow Plowing Stubble Clearing

YAO Wenyan　ZHAO Dianbao　MIAO Hequan　CUI Peide　WEI Maojian　DIAO Peisong
(*School of Agricultural Engineering and Food Science*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255049, *China*)

Abstract: In view of the problem that excessive wheat straw residues blocked the furrow opener in the no-tillage sowing operation in Huang-Huai-Hai region, an oblique anti-blocking device was proposed to achieve the cleaning of the seedling bed in the form of dial-off stubble and shallow rotation stubble. The structural parameters of the anti-blocking device were designed to determine the stubble clearing width, tillage spacing, knife shaft position and inclination range. According to the device structure, the force analysis of the plough blade in the anti-blocking process was carried out to determine the factors affecting the working performance. Through the discrete element simulation of anti-blocking device in the field operation process, taking straw cleaning rate, soil disturbance coefficient and power consumption as evaluation indexes, regression analysis and significance test were carried out on the inclination angle, revolution speed and forward speed of the device, and the influence of various factors on the evaluation index and the primary and secondary order were determined. The order of influence on straw clearance rate and soil disturbance coefficient was inclination angle, forward speed and rotational speed, and the order of influence on power consumption was inclination angle, rotational speed and forward speed. Through the multi-objective function optimization of the regression model, the optimal combination of parameters was obtained as follows: rotational speed of 400 r/min, forward speed of 6 km/h, inclination of 18.5°, and the straw clearance rate was 74.5%, the soil disturbance coefficient was 34.7%, and the power consumption was 1.36 kW. The soil bin test was carried out on the device with the optimized parameters to verify the working performance of the anti-blocking device. The test results showed that compared with the inclination angle of 0°, when the rotational speed was 400 r/min, the forward speed was 6 km/h, and the inclination angle was 18.5°, the straw clearance rate and the straw side throw were

收稿日期: 2022-03-07　修回日期: 2022-05-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000401-2)和山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY020615)
作者简介: 姚文燕(1990—),女,博士生,主要从事旱作农业机械化体系及装备研究,E-mail: 1938191541@qq.com
通信作者: 刁培松(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事旱作农业机械化体系及装备研究,E-mail: dps2003@163.com

improved, the soil disturbance coefficient was increased, the moving soil rate was increased, the soil backfill rate was decreased, the power consumption was increased, the three-axis resultant force was decreased, and the three-axis resistance was increased. At this time, the straw clearance rate was 92.5%, the soil disturbance coefficient was 29.6%, and the power consumption was 1.51 kW. The test results were consistent with the optimization results of the simulation test, which met the design requirements.

Key words: no-tillage planter; shallow plowing stubble clearing; oblique anti-blocking device; EDEM simulation; soil bin test

0　引言

小麦玉米接茬轮作是黄淮海地区主要的种植模式,近年来随着保护性耕作技术的推广和应用,对玉米免耕播种机具提出了更高的要求。目前小麦联合收获秸秆处理方式仍存在小麦秸秆粉碎过长、抛撒不均匀和留茬过高的现象,过量的残茬对下茬作物的免耕播种造成了困难。此外,还田后的秸秆多浮于地表,短期内不易腐烂,残留在播种带上的秸秆直接影响后期玉米的生长[1-3]。

国内学者对麦秸覆盖地免耕播种机防堵装置进行大量的研究,根据秸秆流移动方向提出了被动清茬拨草轮齿式[4]和导草辊式[5]防堵装置,但不适用于秸秆量较大的地区。根据“秸秆移位”提出了主动立式刀辊[6-7]、垂直刀齿式[8]、纵向弹齿式[9-10]和刀齿式[11-12]等新型防堵装置,虽在一定程度上解决了玉米免耕播种问题,但存在功耗过大、残茬拨离苗带发生回填、没被拨离的根茬易回弹等问题。国内学者对斜置清茬主要是以玉米原茬地为主,少有将斜置旋耕应用到麦茬地,现有的研究表明在特定条件下斜置旋耕可有效降低功耗,提高侧抛量。针对旋切清茬,赵宏波等[13]设计了一种只有侧切刃的旋切刀,将旋切刀运用到条带式旋切后抛防堵装置,实现降耗清茬的作用。针对倾斜刀齿侧抛清茬,陈海涛等[14]设计了一种倾斜刀齿主动式防堵装置,清秸刀回转轴垂直面与机具前进夹角为 20°,有效减少玉米残茬向播种带的抛撒量。在斜置旋耕方面,王国林等[15]最早提出一种刀辊与机组前进方向呈一偏角、可降低功耗的新型旋耕方式,并进行理论分析;孔令德等[16]对斜置旋耕进行了大量研究,在特定的条件下斜置角在 15°~20°时,旋耕比功耗可达到最小值,且斜置旋耕与正置旋耕相比可有效地降低功耗;高建民等[17]提出斜置潜土逆转旋耕,实现低能耗与短刀深旋耕的功能。上述研究为斜置浅旋清茬提供了理论和技术支撑。

本研究主要解决玉米免耕播种时小麦秸秆覆盖量大的问题,在实现秸秆与土壤混埋时,增大秸秆残茬侧向抛出播种带的距离,有效减少残茬的回填率。通过理论分析与离散元相结合的方式,确定防堵装置结构参数和影响工作性能的因素,结合土槽试验对其工作性能进行验证,以期为防堵装置的设计提供理论依据。

1　防堵装置结构设计与分析

1.1　防堵装置工作原理

在不改变旋耕刀结构参数的基础上,增大触茬面积(切削宽度)和切茬角,防堵装置结构简图如图 1 所示。该装置是由两组旋耕装置构成,每组配备 2 个旋耕刀(IT225 型),旋耕刀固定于刀盘上,工作时刀轴带动耕刀旋转,旋耕刀回转平面与机具前进方向呈一定的夹角,清茬时刀刃按与刀轴中心的距离先近后远依次接触秸秆土壤,对覆盖在地表的秸秆及杂草进行切割与拨离,同时将部分残茬侧向抛出到苗带一侧,从而实现对苗带的浅旋耕作。清茬后苗带形成一条类似 W 形沟,利于施肥开沟器从沟内穿过,形成一条清洁的苗带种床环境,可有效解决苗带秸秆拥堵问题。

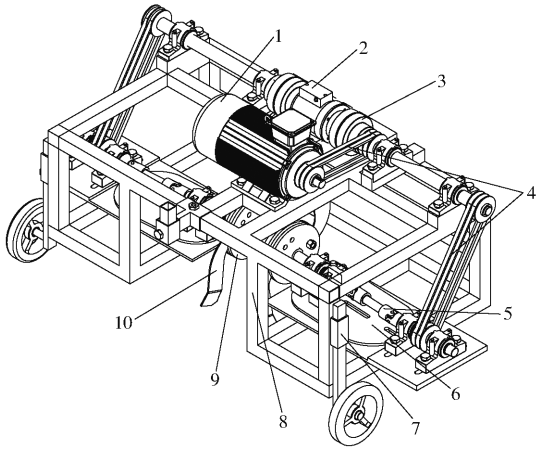


图 1　防堵试验装置结构简图

Fig. 1　Structure diagram of anti-blocking test device

1. 电机　2. 扭矩传感器　3. 联轴器　4. 传动带　5. 万向联轴器　机架　6. 角度调节装置　7. 深度调节装置　8. 机架　9. 刀盘　10. 耕刀

1.2　防堵装置结构参数设计

1.2.1　清茬幅宽

黄淮海地区小麦种植规格以传统条播和宽苗带

播种为主,条播行距为 120 ~ 180 mm,苗带宽 20 ~ 40 mm,3 行为 1 幅;宽苗带播种行距为 280 ~ 300 mm,苗带宽 80 ~ 120 mm,均匀播种;玉米种植行距以 600 mm 为主,种植行距内小麦残茬宽度具有不均匀性,宽度可达 240 mm。过量的残茬对开沟器作业造成困难,减少残茬在播种带上的堆积,需对清茬宽度做出要求。在浅旋清茬斜置式防堵装置中单侧耕刀清茬宽度为 w_1、两组耕刀中间预留的最小未清茬耕作宽度为 w_2,清茬幅宽为 W。结合图 2a 可知,单侧耕刀清茬宽度为

$$w_1 = L_{BC}\sin\theta = 2\sin\theta\sqrt{2Rh - h^2} \tag{1}$$

式中 L_{BC}——耕刀切土与离土径向距离,mm

R——耕刀回转半径,mm

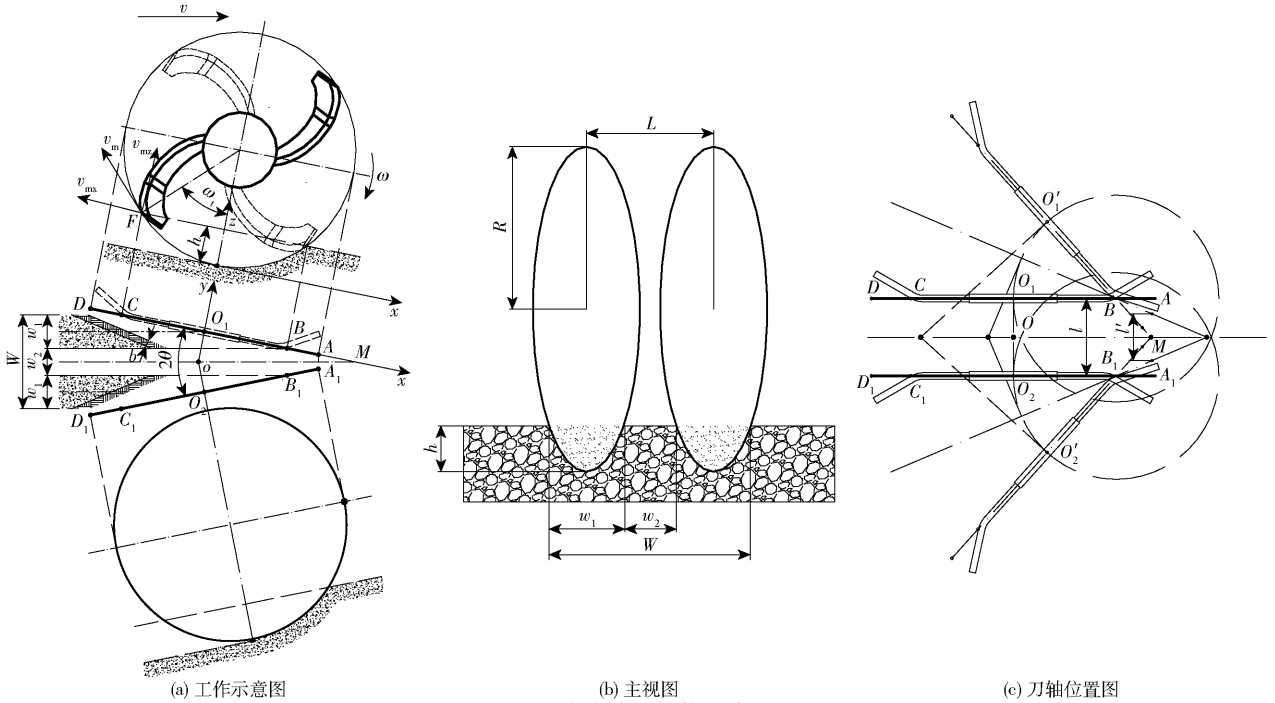
h——耕深,mm

θ——耕刀回转平面与前进方向倾角,(°)

清茬幅宽为

$$W = 2w_1 + w_2 = 4\sin\theta\sqrt{2Rh - h^2} + w_2 \tag{2}$$

由上述可知,在耕深与回转半径保持恒定时,清茬幅宽与倾角、最小未清茬耕作间距有关。



(a) 工作示意图 (b) 主视图 (c) 刀轴位置图

图 2 防堵装置结构示意图

Fig. 2 Structure diagrams of anti-blocking device

1.2.2 最小未清茬耕作间距

在对装置结构参数与作业过程分析中,最小未清茬耕作间距由装置结构和作业要求决定。两组耕刀在空间延长线的交点为 M,折弯处展开线端点距离为 L_{AA_1},耕刀折弯处展开线端点到折弯处距离为 L_{AB}。工作时两组耕刀在空间上最短接触距离为耕刀折弯处,最小未清茬耕作距离为

$$w_2 = 2L_{AB}\sin\theta + L_{AA_1} = 2(R - \sqrt{2Rh - h^2})\sin\theta + L_{AA_1} \tag{3}$$

两耕刀刀轴中心交点位置如图 2c 所示,为保证 w_2 不变,耕刀倾角发生变化时,两刀轴中心点分别在 $\overset{\frown}{O_1O_1'}$ 和 $\overset{\frown}{O_2O_2'}$ 上移动。两耕刀在空间上最短接触距离 l 与倾角相关(图 2c),倾角为 0°时两耕刀侧切刃平行,l 最大;随着倾角的增加,l 先由耕刀折弯处决定,后由正切刃向耕刀端点处曲线决定,l 不断减小;l 与两耕刀端点距离相同时,倾角可达最大值,此后 l 不变。由图 2 可知,平面交点 O 到刀轴回转中心的距离为 L_{OO_1},两组耕刀回转中心距 $L_{O_1O_2}$,耕刀刀轴位置与倾角应满足

$$\begin{cases} L_{OO_1} = R\sin\theta + 0.5L_{AA_1}/\sin\theta \\ L_{O_1O_2} = 2R\sin\theta + L_{AA_1} \end{cases} \tag{4}$$

目前玉米播种机常规圆盘开沟器开沟宽度为 1.5 ~ 4 mm,锄铲式与芯铧组合式开沟器开沟宽度为 50 mm。考虑到刀型安装问题,当两组耕刀折弯处展开线端点距离为 50 mm,耕深为 50 mm,耕刀回转半径为 225 mm,耕刀与机具前进方倾角为 18.5° 时,最小未清茬耕作间距 100 mm,清茬幅宽 277 mm。

1.2.3 倾角

以耕刀顶点与土壤接触最低点为坐标原点,建立坐标系 O_1xyz,x 轴为耕刀回转方向,与机具前进方向倾角为 θ,y 轴为苗带清整方向,z 轴为地面垂直方向,耕刀顶点在 x、y、z 轴方向的分速度为

$$\begin{cases} v_x = v\cos\theta + R\omega\cos(\omega t) \\ v_y = v\sin\theta \\ v_z = R\omega\sin(\omega t) \end{cases} \tag{5}$$

式中　v——机具前进速度，m/s

ω ——耕刀角速度，rad/s

因耕刀在清茬过程中，一面旋转，一面随机具前进，因此耕刀的绝对运动是刀轴旋转和机具前进两种运动的合成，耕刀顶点的运动轨迹是余摆线。

在地面坐标系 xO_1y 上，耕刀顶点的速度为

$$v_{xy} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v^2 + R^2\omega^2\cos^2(\omega t) + 2vR\omega\cos\theta\cos(\omega t)} \tag{6}$$

式中　v_{xy}——耕刀侧推速度，m/s

在地面坐标系 xO_1z 上，耕刀顶点的速度为

$$v_{xz} = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} = \sqrt{v^2\cos^2\theta + R^2\omega^2 + 2vR\omega\cos\theta\cos(\omega t)} \tag{7}$$

式中　v_{xz}——耕刀后抛速度，m/s

在坐标系 O_1xyz 上，耕刀顶点的绝对速度为

$$v_{xyz} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{v^2 + R^2\omega^2 + 2vR\omega\cos\theta\cos(\omega t)} \tag{8}$$

式中　v_{xyz}——耕刀顶点的绝对速度，m/s

根据公式(6)～(8)，利用 Origin 2017 绘制出机具前进速度为 8 km/h、转速为 400 r/min 和倾角为 0°～90°时，耕刀顶点侧推速度 v_{xy}、后抛速度 v_{xz} 和绝对速度 v_{xyz} 随相位角 ωt 的变化曲线。由图 3 可知，0°、45°、90°是 θ 的 3 个特殊倾角，当 θ 为 0°时相同相位角内侧推速度波动最大；当 θ 为 90°时相同相位角内后抛速度、绝对速度保持不变；当 θ 在 0°～45°时，耕刀侧推速度、后抛速度、绝对速度三者相对于相同相位角内的速度波动相差较小；随着 θ 的增加，θ 趋近 90°时相同相位角内 3 种速度的波动减小，后抛速度和绝对速度趋于平稳。根据耕刀的类型，倾角大于 45°时，耕刀弯折角受力会随之增大，不适用此刀型。因侧推速度和后抛速度直接影响残茬拨离苗带的距离和土壤扰动系数，速度过大土壤扰动系数增加，过小不利于秸秆的清除。选取 22.5°、30°、37.5°作为倾角，进行耕刀顶点速度变化趋势分析，由图 3 可知在此区间相同相位角内 3 种速度的波动相差不大。因此，结合公式与耕刀顶点变化曲线可知倾角的取值范围为 0°～45°，根据文献[15－17]经综合考虑选取 15°～45°作为清茬装置耕刀与机具前进方向倾角范围。

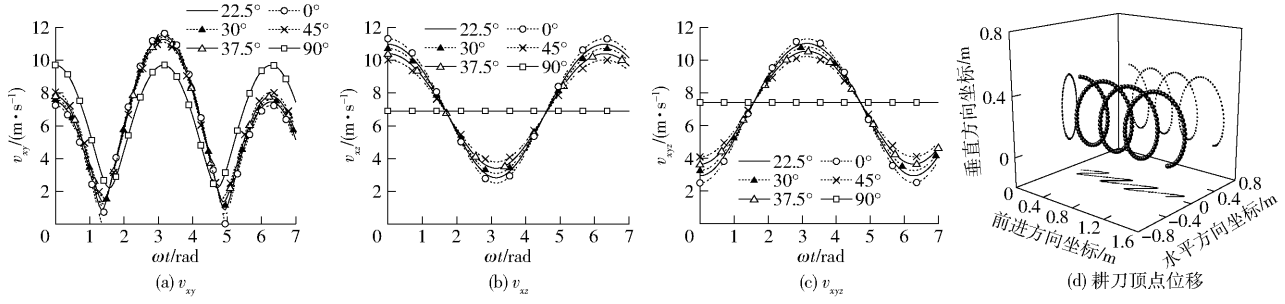


图 3　耕刀顶点速度与位移变化曲线

Fig. 3　Curves of speed and displacement at top of rotary blade

1.2.4　耕深

浅旋耕作时，耕刀动土量与工作幅宽、正切面弯折角、入土深度、正切刀面宽度有关，动土量越大，耕刀承受工作阻力也越大。条播耕作是以形成宽 50～200 mm 和深 50～200 mm 窄苗床带的保护性耕作方法[18]。目前黄淮海地区玉米种肥深度一般在 30～50 mm，底肥深度较大且宜采用分层施肥装置，残茬对其影响不大。小麦根系在土壤中沿竖向为上稠下稀，根系主要集中于离地表 60 mm 处，综上在对耕刀耕深选取时，取 $h \leqslant 50$ mm 即可，本文试验装置通过限深轮来达到浅旋深度要求。

2　秸秆与土壤运动分析

耕刀顶点与地面接触时(点 H)，残茬和土壤与耕刀发生相互作用，耕刀顶点在$\overset{\frown}{EH}$处运动时，残茬和土壤在防堵装置的作用下，不仅随耕刀做圆周运动，而且随着机具前进方向运动，同时残茬和土壤内部发生相互作用物体产生不规则运动。耕刀与地面开始分离时(点 G)，假设发生弹性碰撞，接触点动量瞬间增加，残茬和土壤获得瞬时速度，在运动过程中残茬与土壤受到自身重力、空气阻力、两者相互作用以及小麦根茬等影响，目前现有的计算模型均忽略空气阻力以及根茬和秸秆的相互作用[19]，对秸秆和土壤受力分析如图 4 所示。

耕刀到达点 H 时，在耕刀的作用下秸秆和土壤发生变形，拨茬入土受力公式为

$$\begin{cases} F_{cp}\cos\tau + mg\cos\varphi - F_c\cos\varphi - F_f \geqslant 0 \\ F_N + mg\sin\varphi = F_{cp}\sin\tau + F_c\sin\varphi \\ F_f = F_N\mu \\ F_{cp} = m\omega^2\rho \\ \boldsymbol{F}_c = 2m\cos\theta\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{\omega} \\ \tau < 90° - \arctan\mu \end{cases} \tag{9}$$

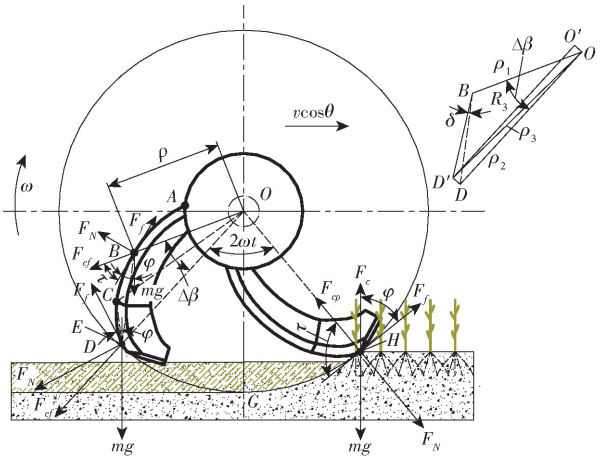


图 4 秸秆与土壤受力分析

Fig. 4 Stress analysis of straw and soil

式中 φ——重力与摩擦力的夹角,(°)

μ——摩擦因数

τ——静态滑切角,(°)

ρ——螺线极径,mm

F_c——科氏力,N

F_{cp}——向心力,N

F_N——耕刀对秸秆和土壤的压力,N

F_f——耕刀与秸秆、土壤的摩擦力,N

m——秸秆和土壤质量,g

耕刀到达点 D 时,秸秆和土壤开始脱离耕刀,脱茬离土受力公式为

$$\begin{cases} F_{cf}\cos\tau + mg\cos\varphi - F_f \geqslant 0 \\ F_N + F_{cf}\sin\tau - mg\sin\varphi = 0 \\ F_{cf} = F_{cp} \\ F_f = F_N\mu \end{cases} \tag{10}$$

式中 F_{cf}——离心力,N

由式(9)、(10)可得到耕刀在清茬过程中的两个阶段,秸秆与土壤运动应符合

$$\begin{cases} \rho(\cos\tau - \mu\sin\tau) \geqslant \dfrac{(2v\omega\cos\theta - g)(\cos\varphi + \mu\sin\varphi)}{\omega^2} \\ \rho \geqslant \dfrac{g(\mu\sin\varphi - \cos\varphi)}{\omega^2\cos\tau + \mu\omega^2\sin\tau} \end{cases} \tag{11}$$

秸秆与土壤在耕刀侧切刃 AC 段时,耕刀侧切刃符合等进螺线,根据侧切刃等进螺旋线方程[17]可确定螺线极径为

$$\rho = \rho_0 + \frac{\rho_n\beta}{\tan\tau_n} \tag{12}$$

式中 ρ_0——螺线起点的极径,mm

ρ_n——螺线终点处极径,取 205 ~ 215 mm

β——螺线上任意点的极角,rad

τ_n——螺线终点处的滑切角,取 50° ~ 60°

根据螺线起点的极径和切土节距[20]关系可知

$$\rho_0 = \sqrt{R^2 + \frac{\pi^2 v^2\cos^2\theta}{\omega^2} - \frac{2\pi v^2\cos^2\theta\sqrt{2Rh - h^2}}{\omega}} \tag{13}$$

秸秆与土壤在耕刀正切刃 CE 段时,耕刀正切刃是一空间曲线,位于刀轴外圆柱面上,在与侧切刃曲线面上的投影可近似圆弧,正切刃与侧切刃的刃口过渡线此处不计。将正切刃沿折弯处展开在平面上,假设展开线同样符合等进螺旋线,根据三角函数得到空间点 D' 到旋转轴中心点的距离为

$$\rho_3 = \sqrt{\rho_2^2 + \tan^2\delta(\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2\cos\Delta\beta)} \tag{14}$$

式中 ρ_1——点 B 处螺线极径,mm

ρ_2——点 D 处螺线极径,mm

ρ_3——点 D' 处螺线极径,mm

$\Delta\beta$——点 B 到点 D 螺线极角的增量,(°)

δ——正切部弯折角,(°)

由式(14)可知,折弯处正切刃任一点处对刀轴的扭矩大于具有相同极径刀刃的耕刀(正切部无弯折),即在选择耕刀时在满足工作条件的基础上选择折弯角较小的耕刀。由图 4 可得出在正切刃 CE 处,回转半径 R_3 等于 ρ_2。通过上述分析可知,秸秆与土壤在侧切刃 AC 处时,回转半径 R 满足式(12);在正切刃 CE 处时,回转半径 R 满足式(14)。将耕刀不同刃点处回转半径代入式(11)可得耕刀侧切刃 AC 段与正切刃 CE 段有

$$\begin{cases} \dfrac{\cos\tau - \mu\sin\tau}{\tan\tau_n} \geqslant \dfrac{(2v\omega\cos\theta - g)(\cos\varphi + \mu\sin\varphi)}{\omega^2(\rho_0\tan\tau_n + \rho_n\beta)} \\ \omega^2\rho_0 + \dfrac{\rho_n\beta\omega^2}{\tan\tau_n} \geqslant g\dfrac{\mu\sin\varphi - \cos\varphi}{\cos\tau + \mu\sin\tau} \end{cases} \tag{15}$$

$$\begin{cases} \rho_3(\cos\tau - \mu\sin\tau) \geqslant \dfrac{(2v\omega\cos\theta - g)(\cos\varphi + \mu\sin\varphi)}{\omega^2} \\ \rho_3 \geqslant \dfrac{g(\mu\sin\varphi - \cos\varphi)}{\omega^2\cos\tau + \mu\omega^2\sin\tau} \end{cases} \tag{16}$$

由式(15)、(16)可以看出,在作业参数确定的情况下,秸秆与土壤在刀刃上的受力与滑切角、极角、重力与摩擦力的夹角、正切部弯折角相关。当刀刃弧度增加时,滑切角减小,重力与摩擦力的夹角增大,极角减小,可为后期耕刀的优化设计提供参考。在耕刀类型确定的情况下,耕刀在不同刃点的受力情况与机具前进速度、刀轴角速度、倾角和耕深相关。因此,本研究是在耕刀类型和耕深确定的情况下,以前进速度、刀轴转速和倾角为影响因素进行试验。

3　防堵装置参数仿真优化

3.1　仿真模型与试验设计

为提高计算机处理效率，根据试验仿真要求在 EDEM 中建立土槽简化模型。土槽尺寸为 6 000 mm × 600 mm × 240 mm（长 × 宽 × 高），其中秸秆、土壤覆盖整个土槽模型，土壤颗粒直径设置为 8 mm，秸秆模型采用直径为 10 mm、球心间距为 5 mm 的球体组合成总长为 100 mm 的长线型。颗粒与颗粒、颗粒与几何体（耕刀）之间的接触模型和参数见文献[21－23]。土槽模型完成后，秸秆层位于土壤层上方，土壤颗粒静态填充土槽深度约为 50 mm，根据提取的数据得到秸秆根数为 2 000。通过离散元模拟防堵装置在田间作业过程，以秸秆清除率、土壤扰动系数和功耗为评价指标，并在秸秆量一定的情况下对影响作业性能的主要因素刀轴转速、前进速度和倾角进行显著分析，根据需求对试验参数进行优化，确定最优的参数组合，试验因素编码如表 1 所示。

表 1　试验因素编码

Tab. 1　Experimental factors and codes

编码	因素		
	刀轴转速/（r·min^{-1}）	前进速度/（km·h^{-1}）	倾角/（°）
2	800	10	45.0
1	700	9	37.5
0	600	8	30.0
－1	500	7	22.5
－2	400	6	15.0

（1）秸秆清除率测定：在距离耕刀工作开始位置 1 500 mm 处，选取 600 mm（宽）×1 000 mm（长）× 100 mm（高）的网格（图 5）。按步长 0.1 s 输出网格上秸秆的根数，统计未耕作与耕作后网格上秸秆的根数，计算秸秆清除率。

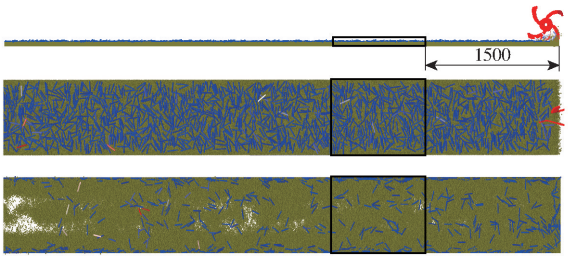


图 5　秸秆清除率测定

Fig. 5　Determination of straw cleaning rate

（2）土壤扰动系数：通过仿真软件的 clipping 功能，选取距中心点 －1 000 mm、层厚为 100 mm 处，作为防堵装置通过的切平面，近似计算出剩余物料的截面积。土壤与秸秆在耕刀通过前后的宽度与深度测量如图 6 所示，土壤扰动系数计算公式为

$$r=\frac{S-S_1}{S}\times 100\% \tag{17}$$

式中　r——土壤扰动系数，%

S——未耕作时横截面积，mm^2

S_1——耕作后横截面积，mm^2

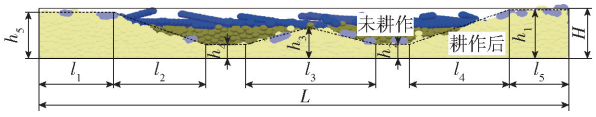


图 6　横截面积测定

Fig. 6　Determination of cross-sectional area

（3）功耗测定：根据转速、转矩和功耗的关系，提取所有颗粒在整个仿真过程中每一步施加到防堵装置的转矩，计算得出工作过程中装置的功耗

$$P_0=\frac{Tn}{9\,550} \tag{18}$$

式中　P_0——仿真过程总功耗，kW

T——仿真全过程的总转矩，N·m

n——耕刀工作过程中的转速，r/min

3.2　试验结果与分析

3.2.1　回归模型建立与方差分析

运用 Design-Expert 对装置参数进三元二次回归正交旋转组合试验（中心点为 9），对仿真结果进行回归分析与显著性检验。试验方案与结果如表 2 所示，A、B、C 为因素编码值。

表 2　试验方案与结果

Tab. 2　Test scheme and results

序号	A	B	C	秸秆清除率 Y_1/%	土壤扰动系数 Y_2/%	功耗 Y_3/kW
1	－1	－1	－1	76.47	45.63	4.04
2	1	－1	－1	78.31	59.30	4.46
3	－1	1	－1	70.56	41.08	5.58
4	1	1	－1	71.69	53.93	5.96
5	－1	－1	1	92.15	57.72	6.33
6	1	－1	1	92.84	54.42	8.53
7	－1	1	1	85.59	53.68	6.55
8	1	1	1	95.12	51.25	7.58
9	－2	0	0	75.96	44.70	5.65
10	2	0	0	87.34	55.39	8.13
11	0	－2	0	88.59	57.39	4.54
12	0	2	0	75.33	44.48	6.60
13	0	0	－2	72.76	42.46	7.17
14	0	0	2	82.22	74.51	8.58
15	0	0	0	74.62	45.94	6.54
16	0	0	0	80.37	44.05	6.74
17	0	0	0	80.22	44.50	6.34
18	0	0	0	84.89	40.18	6.06
19	0	0	0	86.50	57.53	5.56
20	0	0	0	80.85	52.77	7.56
21	0	0	0	85.08	54.18	6.08
22	0	0	0	85.04	54.25	7.03
23	0	0	0	85.98	45.48	6.93

(1)秸秆清除率

秸秆清除率试验结果方差如表 3 所示。整体试验结果显著($0.01 \leqslant P < 0.05$),刀轴转速、前进速度、倾角对秸秆清除率影响分别为较显著、显著、极显著,交互项与二次项对响应值都不显著,各因素对响应值的影响主次顺序是C、B、A。剔除不显著因素后,得到各因素水平对秸秆清除率影响的回归方程为

$$Y_1 = 82.11 + 2.25A - 2.71B + 5.47C \quad (19)$$

对方差进行失拟性检验 $P = 0.287\ 8$,不显著($P > 0.1$),表明试验分析结果合理,回归方程拟合度高。模型决定系数 R^2 在剔除不显著因素前后分别为 0.699 6、0.645 4,表明该模型可以拟合 65% 以上的结果,用来进行试验预测。

表 3 性能指标方差分析

Tab. 3 Analysis of variance of performance index

项目	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
秸秆清除率	模型	734.25	9	81.58	3.37	0.023 6 **
	A	80.68	1	80.68	3.33	0.091 2 *
	B	117.30	1	117.30	4.84	0.046 5 **
	C	479.29	1	479.29	19.77	0.000 7 ***
	AB	8.24	1	8.24	0.34	0.570 0
	AC	6.57	1	6.57	0.27	0.611 3
	BC	8.52	1	8.52	0.35	0.563 5
	A^2	0.036	1	0.036	1.48×10^{-3}	0.969 9
	B^2	0.049	1	0.049	2.026×10^{-3}	0.964 8
	C^2	32.62	1	32.62	1.35	0.266 9
	残差	315.14	13	24.24		
	失拟项	193.76	5	38.75	2.55	0.114 7
	误差	121.39	8	15.17		
	总和	1 049.39	22			
土壤扰动系数	模型	938.20	9	104.24	3.17	0.029 4 **
	A	111.07	1	111.07	3.37	0.089 2 *
	B	115.30	1	115.30	3.50	0.084 0 *
	C	412.19	1	412.19	12.52	0.003 6 ***
	AB	1.62×10^{-4}	1	1.620×10^{-4}	4.920×10^{-6}	0.998 3
	AC	129.94	1	129.94	3.95	0.068 5 *
	BC	0.92	1	0.92	0.028	0.869 7
	A^2	3.01	1	3.01	0.092	0.767 1
	B^2	8.50	1	8.50	0.26	0.620 0
	C^2	166.94	1	166.94	5.07	0.042 3 **
	残差	428.03	13	32.93		
	失拟项	142.99	5	28.60	0.80	0.577 9
	误差	285.03	8	35.63		
	总和	1 366.23	22			
功耗	模型	24.34	9	2.70	4.87	0.005 3 ***
	A	5.05	1	5.05	9.09	0.009 9 ***
	B	2.58	1	2.58	4.65	0.050 3 *
	C	8.66	1	8.66	15.59	0.001 7 ***
	AB	0.18	1	0.18	0.33	0.575 8
	AC	0.74	1	0.74	1.33	0.269 8
	BC	1.78	1	1.78	3.20	0.097 0 *
	A^2	0.017	1	0.017	0.031	0.863 9
	B^2	2.62	1	2.62	4.72	0.048 9 **
	C^2	2.06	1	2.06	3.71	0.076 2 *
	残差	7.22	13	0.56		
	失拟项	4.31	5	0.86	2.36	0.133 9
	误差	2.91	8	0.36		
	总和	31.56	22			

注:*** 表示极显著($P < 0.01$);** 表示显著($0.01 \leqslant P < 0.05$);* 表示较显著($0.05 \leqslant P < 0.1$)。

(2)土壤扰动系数

土壤扰动系数整体试验结果显著($0.01 \leqslant P < 0.05$),刀轴转速 A、前进速度 B、倾角 C 对土壤扰动系数影响分别为较显著、较显著、极显著,刀轴转速 A 与倾角 C 交互项以及倾角 C 的二次项对土壤扰动系数影响显著,其余项对响应值都不显著。各因素对响应值的影响主次顺序是 C、B、A。剔除不显著因素后,得到各因素水平对土壤扰动系数影响的回归方程为

$$Y_2 = 49.45 + 2.63A - 2.68B + 5.08C - 4.03AC + 2.34C^2 \quad (20)$$

对方差进行失拟性检验 $P = 0.851\ 6$,不显著($P > 0.1$),表明试验分析结果合理,回归方程拟合度高。模型决定系数 R^2 在剔除不显著因素前后分别为 0.686 7、0.678 4,表明该模型可以拟合 68% 以上的结果,用来进行试验预测。

(3)功耗

功耗试验结果方差如表 3 所示,整体试验结果极显著($P < 0.01$),刀轴转速 A、前进速度 B、倾角 C 对功耗影响分别为极显著、较显著、极显著,前进速度 B 与倾角 C 交互项对功耗影响较显著,前进速度 B 的二次项对功耗影响显著,倾角 C 的二次项对功耗影响较显著,其余项对响应值都不显著。各因素对响应值的影响主次顺序是 C、A、B。剔除不显著因素后,得到各因素水平对功耗影响的回归方程为

$$Y_3 = 6.49 + 0.56A + 0.4B + 0.74C - 0.47BC - 0.31B^2 + 0.27C^2 \quad (21)$$

对方差进行失拟性检验 $P = 0.212$,不显著($P > 0.1$),表明试验分析结果合理,回归方程拟合度高。模型决定系数 R^2 在剔除不显著因素前后分别为 0.771 2、0.741 4,表明该模型可以拟合 74% 以上的结果,用来进行试验预测。

3.2.2 响应面分析

利用 Design-Expert 软件对试验结果进行分析处理,得到转速、倾角和前进速度交互作用对土壤扰动系数与功耗的响应曲面,如图 7 所示。

前进速度为 6 km/h 时,转速和倾角交互对土壤扰动系数影响如图 7a 所示,土壤扰动系数随着倾角与转速的增加而增加。当转速为 400 ~ 645 r/min

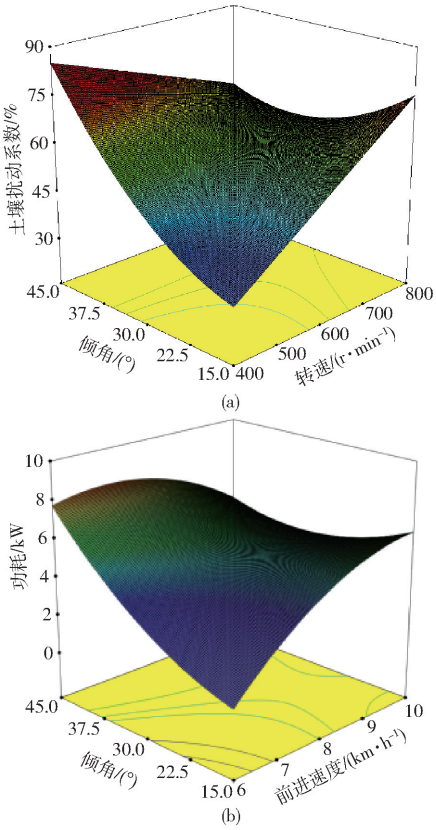


图 7　交互因素对各指标影响的响应曲面

Fig. 7　Response surfaces of interaction factors to indexes

时，土壤扰动系数随倾角的减小而减小，转速为 645 ~ 800 r/min 时趋势相反，在土壤扰动系数较小的情况，转速的最优取值范围为 400 ~ 645 r/min。当倾角为 15° ~ 35°时，土壤扰动系数与转速正相关；当倾角为 35° ~ 45°时，土壤扰动系数与转速负相关，倾角的最优取值范围为 15° ~ 35°。当转速为 400 r/min 时，前进速度和倾角交互对功耗影响如图 7b 所示，当速度为 6 ~ 8.4 km/h 时，功耗与倾角正相关，在 8.4 ~ 10 km/h 时负相关；当倾角为 15° ~ 37.5°时，功耗与速度正相关，37.5° ~ 45°时负相关。

3.2.3　参数优化

为获得较优工作性能参数，对回归模型进行优化求解，根据实际作业条件和工作要求，选择目标函数和约束条件，目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(A,B,C) \\ \min Y_2(A,B,C) \\ \min Y_3(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -2 \leqslant A \leqslant 2 \\ -2 \leqslant B \leqslant 2 \\ -2 \leqslant C \leqslant 2 \end{cases} \\ \text{s.t.} \begin{cases} 70\% \leqslant Y_1 \leqslant 100\% \\ 0 \leqslant Y_2 \leqslant 40\% \\ 0 \leqslant Y_3 \leqslant 10\ \text{kW} \end{cases} \end{cases} \tag{22}$$

在对仿真参数进行响应面分析时，得到参数最优的组合为：转速 400 r/min、前进速度 6 km/h、倾角 18.5°，此时秸秆清除率为 74.5%、土壤扰动系数为 34.7%、功耗为 1.36 kW。

4　室内土槽试验

4.1　试验设备与材料

本研究试验在土槽中进行（图 8），台架装置固定到台车上，台车提供试验装置恒定的前进速度和准确的作业深度，电机通过变频器为试验提供刀轴所需转速，角度调节装置和万向节联轴器实现 0° ~ 45°范围内倾角调节。试验过程中工作扭矩和转速通过动态扭矩传感器 HCNJ - 101、双路信号转换模块 MKMN - 2 将数据传输到便携式计算机，M400 软件实时记录装置转速–扭矩动态变化。



图 8　土槽试验

Fig. 8　Soil bin test

本试验采用土槽内原有的砂壤土，耕作前将土壤进行充分灌溉，待土壤层可进行耕作时进行旋耕粉碎，利用台车自带的锄铲与压实装置对土壤耕作层进行压实、整平，通过土壤水分仪（STEPS3000 型）和土壤紧实度测量仪（TJS - 450G 型）测定含水率与耕作层土壤坚实度。将收集的未经处理的田间小麦秸秆均匀铺放在 1.5 m × 5 m 的土壤层表面，秸秆覆盖量为 0.5 kg/m^2，小麦秸秆含水率为 7.24%，满足小麦残茬覆盖率要求，测定土壤坚实度与含水率时随机在防堵装置前进方向选取 3 点，计算其平均值，试验时测定结果为：土壤 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm 土层内土壤平均含水率为 3.45%、9.08%，土壤坚实度为 2.5、3.1 MPa。

4.2　试验内容与方法

根据仿真试验结果，倾角选取 0°（对照组）和 18.5°（试验组），刀轴转速 400 r/min，台车前进速度 6 km/h，耕深 50 mm，最小未清茬耕作间距 100 mm 为作业参数，对防堵装置试验台进行防堵性能试验，以残茬秸秆量[24]、苗床参数[25-26]和功耗为指标对防堵性能参数进行测定。

(1)残茬秸秆量的测定。单次试验完成后在测试区内,收集浮在地表的秸秆,忽略掩埋在土壤层中的秸秆,称量剩余秸秆的总质量,计算秸秆清除率。

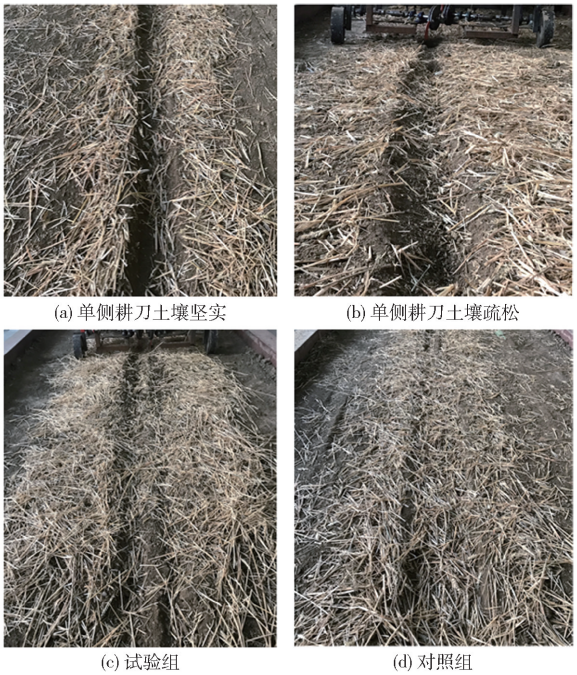
(2)苗床参数。苗床参数主要包含土壤扰动系数、沟形、动土率(≤40%)、沟深和土壤回填率等。工作时耕作深度保持不变,在测试区内工作幅宽上随机选取防堵装置通过后的横截面 3 处,在横截面处用硬纸板绘制沟形[27]。为便于计算沟形面积,在测量时忽略沟形内侧面不平整区域,近似计算剩余物料的横截面积,得出该装置的土壤扰动系数。测量完成后取出沟槽内的土壤计算土壤回填率,并测量最低点距离地表的深度。

(3)功耗与力测定。由于试验装置无法精确采集耕刀与地表接触点的瞬时功耗和阻力,本试验是在耕刀平稳工作后,通过提取动态扭矩传感器数据得到耕刀功耗。通过六分力装置得出工作过程中测力架水平合力、垂直合力和侧向合力。扭矩传感器和六分力传感器输出频率为 10 Hz。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 清茬效果分析

耕刀的清茬效果主要通过土壤表层的残茬秸秆量进行衡量。试验开始前先进行防堵装置单刀土槽试验,确定合适的测试区域,试验结果如图 9 所示。在土壤疏松区域,犁沟一侧形成混合物料凸起层(图 9b),不符合实际田间作业土壤坚实度。为符合实际田间土壤环境,选取土壤坚实度适中的区域进行试验,通过试验得到土壤层坚实度不小于 1.5 MPa(0~5 cm)(图 9a)。



(a) 单侧耕刀土壤坚实 (b) 单侧耕刀土壤疏松

(c) 试验组 (d) 对照组

图 9 试验结果

Fig. 9 Experiment results

试验指标数据如表 4 所示,通过对试验数据分析,试验组在转速 400 r/min 时,秸秆清除率为 92.5%,对照组秸秆清除率为 82.5%,秸秆清除率提高 14.7%。通过图 9c 与图 9d 可以看出,倾角的增加使秸秆侧抛量增加,可有效减少秸秆回填到种沟,同时可以看出苗床上残留的秸秆量减少,未耕作区域秸秆残留量明显小于倾角 0°,对苗床秸秆清整效果明显。

表 4 试验结果

Tab. 4 Experiment results

倾角/(°)	秸秆清除率/%	土壤扰动系数/%	动土率/%	土壤回填率/%	功耗/kW	水平阻力/N	垂直阻力/N	侧向阻力/N
0	82.5	17.2	25.0	56.3	1.45	47.35	73.33	57.96
18.5	92.5	29.6	33.3	53.5	1.51	58.34	31.39	86.55

4.3.2 苗床参数

在试验过程中单个耕刀会在土槽内形成一个 U 型沟,随着转速的增加切土节距增大、土壤的碎土率提高、沟底内的凸起高度减小。防堵装置在铺满秸秆的土槽内工作时会在苗带上形成 W 沟型,但由于耕刀、秸秆和土壤的相互作用造成底部和沟两侧不规则,沟型截面形状如图 10 所示,耕刀耕深不变,L 为工作幅宽,L_1 为理论耕刀单侧动土宽度,L_2 为倾角 18.5°时动土宽度,L_3 为倾角 0°时动土宽度,倾角的增大,造成沟型边界增大,在中部形成的凸起边界相差不大。

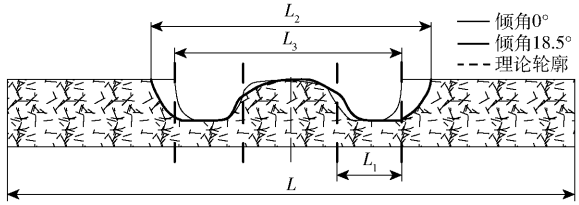


图 10 沟型边界线

Fig. 10 Groove boundary line

动土率是保护性耕作少耕播种作业时的动土程度,与地表动土宽度和工作幅宽有关,本研究为进一步体现防堵装置的工作性能,将土壤扰动系数和土壤回填率也作为苗床参数的指标。参照对照组可知倾角的增加会导致土壤扰动系数、动土率和土壤回填率的变化,试验结果数据见表 4,相对于对照组苗床参数分别提高 72.1%、33.2% 和降低 5.0%。倾角的增大导致清茬幅宽的增加,对土壤扰动系数与动土率影响较大,对土壤回填率影响较小,整体相差不大,苗床参数符合国家标准要求。

4.3.3 功耗

相位角是表征切土位置的重要参数,耕刀处于

不同的相位角时与土壤接触状态不同，受力也不同[28]。耕刀在旋转过程中切入土壤时的时间不同，反映在扭矩传感器与六分力传感器上的数值不同。根据图 2a 所示，相位角的大小为 ωt，当相位角为 0° 时达到最大入土深度，耕刀开始拨茬切土和脱茬离土时相位角与耕深和回转半径有关。本研究土槽试验耕刀回转半径 225 mm、耕深 50 mm，得到相位角为 321°时开始切土，相位角 39°时出土，在一个旋转周期内耕刀耕作占 22%。根据试验得到转速在 400 r/min 时，对照组与试验组功耗相差不大。倾角为 18.5°时，功耗为 1.51 kW（表 4），与倾角 0°相比功耗增加 4.7%。

水平合力反映了机具前进方向的阻力，垂直合力反映了机具重力方向的合力，对工作稳定性具有重要影响，侧向合力反映了机具工作时左右两侧合力，影响机具的平稳性。根据六分力传感器得到测力架的水平合力、垂直合力和侧向力合力如图 11 所示，水平合力在不同倾角下，运动趋势相同，整体相差不大，而垂直合力与侧向合力在倾角 0°时明显高于倾角18.5°，且与合力反向（图 11）。为更明确装置工作时的受力情况，将试验开始时测力架所受合力与清茬工作时测力架所受合力进行分析得到耕刀清茬时的三向阻力（表 4），根据试验数据可知倾角的增大会导致水平阻力与侧向阻力的增加，垂直阻力减小，这与理论分析结果相符。

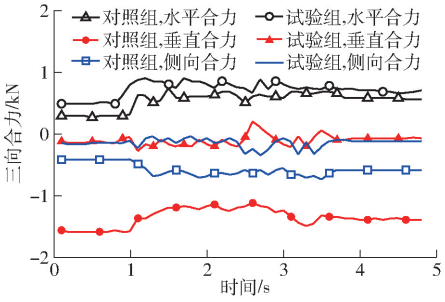


图 11　测力架三向合力变化曲线

Fig. 11　Variation curves of three-dimensional resultant force of dynamometer

5　结论

（1）设计了一种主动式浅旋斜置式防堵装置，通过理论分析确定装置的结构参数（倾角、回转半径、刀轴相对位置）和作业参数（耕深、清茬幅宽、清茬耕作间距）以及两者之间的关系。根据装置结构，对防堵作业过程中残茬与土壤进行受力分析，确定前进速度、刀轴转速和倾角为主要影响因素。

（2）运用 EDEM 仿真试验，模拟装置在田间作业过程，以秸秆清秸率、土壤扰动系数和功耗为评价指标，对影响作业性能的刀轴转速、前进速度和倾角进行显著性检验。根据实际作业条件和工作要求，在满足防堵性能试验情况下最优参数组合为转速 400 r/min、前进速度 6 km/h、倾角 18.5°，此时秸秆清除率为 74.5%、土壤扰动系数为 34.7%、功耗为 1.36 kW。

（3）将扭矩传感器与六分力传感器结合，在土槽试验平台上对防堵装置进行台架试验，工作参数在转速 400 r/min、前进速度 6 km/h、倾角 18.5°时，秸秆清除率为 92.5%、土壤扰动系数为 29.6%、功耗为 1.51 kW，其余性能参数满足作业要求。相同条件下与倾角 0°对比分析，秸秆清除率与秸秆侧抛量提高，整体苗床参数相差不大，功耗增加，水平阻力与侧向阻力增加，垂直阻力减小。

参　考　文　献

[1] 高娜娜，张东兴，杨丽，等. 驱动分禾杆与被动分禾栅板组合式防堵机构设计[J]. 农业机械学报，2014，45(6)：85－91，52.
GAO Na'na，ZHANG Dongxing，YANG Li，et al. Design of anti-blocking mechanism combined driven divider with passive residue separating device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2014，45(6)：85－91，52.（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 progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(4)：1－19.（in Chinese）

[3] 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）

[4] 范旭辉，贾洪雷，张伟汉，等. 免耕播种机仿形爪式防堵清茬机构参数分析[J]. 农业机械学报，2011，42(10)：56－60.
FAN Xuhui，JIA Honglei，ZHANG Weihan，et al. Parametric analysis of finger-type anti-blocking residue-cleaner for no-till planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2011，42(10)：56－60.（in Chinese）

[5] 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 Na'na. 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）

[6] 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)
[7] 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)
[8] 顾峰玮,胡志超,陈有庆. 洁区播种思路下麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机研制[J]. 农业工程学报,2016,32(20):15 - 23.
GU Fengwei, HU Zhichao, CHEN Youqing, et al. Development and experiment of peanut no-till planter under full wheat straw mulching based on "clean area planting"[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 15 - 23. (in Chinese)
[9] 史乃煜,陈海涛,王星,等. 弹齿式清秸装置防止残茬回带机构设计与试验优化[J]. 农业机械学报,2019,50(4):84 - 91.
SHI Naiyu, CHEN Haitao, WANG Xing, et al. Design and experiment optimization of prevent bring back stubble mechanism of spring-tooth type cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 84 - 91. (in Chinese)
[10] 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-cleaner[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(6): 26 - 34. (in Chinese)
[11] 王汉羊,陈海涛,纪文义. 2BMFJ - 3 型麦茬地免耕精播机防堵装置[J]. 农业机械学报,2013,44(4):64 - 70.
WANG Hanyang, CHEN Haitao, JI Wenyi. Anti-blocking mechanism of type 2BMFJ - 3 no-till precision planter for wheat stubble fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 64 - 70. (in Chinese)
[12] 陈海涛,李昂,史乃煜,等. 玉米秸秆残茬侧向抛出动力学模型建立与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):76 - 83.
CHEN Haitao, LI Ang, SHI Naiyu, et al. Kinetics modeling and experiment of lateral throwing of corn straws[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 76 - 83. (in Chinese)
[13] 赵宏波,何进,李洪文,等. 条带式旋切后抛防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):65 - 75.
ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of strip rotary-cut-throw anti-blocking implement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 65 - 75. (in Chinese)
[14] 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)
[15] 王国林,王新忠,桑正中. 斜置式旋耕研究初探[J]. 农业机械学报,1998,29(增刊):21 - 25.
[16] 孔令德,桑正中,王国林. 斜置旋耕试验研究[J]. 农业机械学报, 2000,31(2): 30 - 34.
[17] 高建民,刘兴达,齐惠冬,等. 斜置潜土逆转旋耕抛土仿真及试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 54 - 63.
GAO Jianmin, LIU Xingda, QI Huidong, et al. Simulation and experiment of soil casting during oblique submerged reversely rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(13): 54 - 63. (in Chinese)
[18] 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(1): 7 - 15.
[19] 侯守印,陈海涛,邹震,等. 原茬地种床整备侧向滑切清秸刀齿设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(6):41 - 51,217.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 41 - 51, 217. (in Chinese)
[20] 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: 235 - 243.
[21] 方会敏. 基于离散元法的秸秆-土壤-旋耕刀相互作用机理研究[D]. 南京:南京农业大学,2016.
FANG Huimin. Research on the straw - soil - rotary blade interaction using discrete element method[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
[22] 罗伟文,胡志超,吴峰,等. 全秸硬茬地小麦播种机碎秸导流装置参数设计与优化[J]. 农业工程学报,2019,35(18):1 - 10.
LUO Weiwen, HU Zhichao, WU Feng, et al. Design and optimization for smashed straw guide device of wheat clean area planter under full straw field[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 1 - 10. (in Chinese)
[23] 姚文燕,赵殿报,刁培松,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, DIAO Peisong, 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)
[24] DB37/T 3707—2019 玉米清茬免耕施肥精量播种机[S]. 2019.
[25] GB/T 20865—2017 免(少)耕施肥播种[S]. 2017.
[26] GB/T 24675.2—2009 保护性耕作机械深松机[S]. 2009.
[27] 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.
[28] 熊平原,杨洲,孙志全,等. 旋耕刀三向工作阻力试验及作业参数优化[J]. 农业工程学报,2017,33(19):51 - 58.
XIONG Pingyuan, YANG Zhou, SUN Zhiquan, et al. Experiment on three-axis working resistances of rotary blade and working parameters optimization[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 51 - 58. (in Chinese)