

免耕播种机星齿凹面盘式清秸防堵装置设计与试验

王 奇^{1,2} 贾洪雷^{1,2} 朱龙图^{1,2} 李名伟^{1,2} 赵佳乐^{1,2}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要: 针对东北地区免耕播种机在玉米秸秆全量粉碎还田作业时,平面爪轮式清秸防堵装置清秸率低、作业性能不稳定,播种机作业质量和工作效率降低等问题,设计一种星齿凹面盘式清秸防堵装置。通过分析作业时秸秆颗粒在凹面清秸盘上的运动规律,确定了影响清秸率的主要结构参数和各参数的取值范围。结合旋转正交试验设计和 EDEM 离散元仿真技术确定了星齿凹面清秸盘的最优结构参数组合,通过田间对比试验验证了该装置的作业性能。研究表明:影响星齿凹面盘式清秸防堵装置作业性能的主要结构参数为清秸盘回转半径、圆盘曲面投影长度和曲率半径。当清秸盘回转半径为 152.5 mm、曲率半径为 160 mm 和圆盘曲面投影长度为 50.9 mm 时,该装置作业性能最佳,苗带清秸率和作业阻力分别为 92.2% 和 142.6 N。星齿凹面盘式清秸防堵装置的工作性能优于平面爪轮式防堵装置,作业质量稳定,满足免耕播种作业农艺和技术要求。

关键词: 免耕播种机; 玉米; 清秸防堵装置; 离散元法; 结构优化

中图分类号: S223.2⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0068-10

Design and Experiment of Star-toothed Concave Disk Row Cleaners for No-till Planter

WANG Qi^{1,2} JIA Honglei^{1,2} ZHU Longtu^{1,2} LI Mingwei^{1,2} ZHAO Jiale^{1,2}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. Key Laboratory of Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The corn planting model of full straw returning and no-tillage sowing techniques was used in the northeastern part of China. Due to the thick and abundant maize straws, limited the quality and efficiency of sowing operations and reduced crop yield, the concave disk row cleaners with star-tooth capable of efficient straw cleaning in whole straw mulching fields were designed. The kinematic pattern of straw particles at surface of disc row cleaner during the operation was clarified through the use of theoretical analysis, the main structural parameters affecting the operational quality of the row cleaners were clarified, and the range of values of each parameter were determined. Combined with rotational orthogonal test design and EDEM discrete element simulation technology, the optimal structural parameter combination of the row cleaner was achieved. The performance of the row cleaners was verified by field comparison test. The results showed that the main structural parameters affecting the performance of the device were radius of gyration of the disk, projection length of disk camber and radius of curvature. When the radius of gyration of the disk was 152.5 mm, the projection length of disk camber was 50.9 mm, and the radius of curvature was 160 mm, the working performance of the row cleaners was the best, and the straw cleaning rate and working resistance were 92.2% and 142.6 N, respectively. The working performance of the row cleaners was better than that of the plane row cleaners, and the operation quality was stable, which satisfied the agronomic and technical requirements of no-till planting.

Key words: no-till sowing; corn; row cleaners; discrete element method; structural optimization

收稿日期: 2018-12-07 修回日期: 2018-12-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD070030201)和吉林省省校共建计划项目(SXGJSF2017-6-1)

作者简介: 王奇(1990—),男,博士生,主要从事保护性耕作及其智能装备研究,E-mail: wangqi_4034@163.com

通信作者: 贾洪雷(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作机械与仿生智能农业机械研究,E-mail: jiah@vip.163.com

0 引言

秸秆覆盖地免耕播种是一项先进的耕作技术^[1],具有节约生产成本、保护土壤和生态环境等优点,近年来在东北地区已得到大面积推广^[2-4]。该地区气候低温易旱、玉米生长周期较长,致使玉米秸秆较为粗壮、量大且难以腐烂^[5],春播时秸秆全量粉碎还田的秸秆覆盖量过大、粉碎长度不一致且分布不均匀,降低了防堵装置的清秸率和作业稳定性,易造成秸秆残茬缠绕、堵塞播种机,降低播种作业质量和工作效率^[6-7]。清理播种行内的秸秆和残茬还具有提升地温,提高种子的出苗率和出苗一致性,增加产量等优点^[8-11]。因此,高质量的清秸防堵作业是保障秸秆覆盖地免耕种植模式作业质量的基础。

目前,防堵装置按照工作原理可分为驱动式和被动式,其中被动平面轮盘式防堵装置因具有土壤扰动小、保墒效果好、作业阻力低等优点,已得到了广泛应用^[12]。近年来,相关学者对被动平面轮盘式防堵装置的轮指结构^[13-16]和轮盘结构^[17]进行改进设计,以提高其作业质量。平面轮盘式防堵装置在半量秸秆还田或垄上作业时具有较高的作业质量,当秸秆覆盖量过大时,其供给秸秆的抛出速度不足^[17],对秸秆的抛掷和推送作用降低,无法及时清理过量的行间秸秆,降低了清秸率;基于2BMZF-2型免耕播种机改进设计的凹面结构爪式秸秆清茬机构,一定程度上提高了对秸秆的抛掷速度和清秸率,但是浮动且与机架铰接的防堵机构无法使其在最佳工作参数下稳定作业,作业稳定性差;且对置安装的轮盘存在漏清区,限制了清秸率的提高。目前,该地区应用的免耕播种机通常安装与播种单体架铰接的平面爪轮式拨茬防堵机构,当在全量秸秆覆盖地作业时,特别是在垄间作业时,同样存在上述问题。因此,需要开发一种适合该地区玉米种植模式的防堵装置。

针对上述问题,本文设计一种能够在中国东北地区玉米秸秆全量粉碎还田进行高效清秸防堵作业的被动式星齿凹面盘式防堵装置,通过理论分析确定清秸盘结构参数及取值范围;通过离散元仿真试验获得清秸盘的最佳结构参数组合;通过田间对比试验验证该装置的作业性能。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

星齿凹面盘式清秸防堵装置的结构如图1所示,由固定架、平行四杆架、作业深度调节推杆、清秸

盘安装架和星齿凹面清秸盘组成。

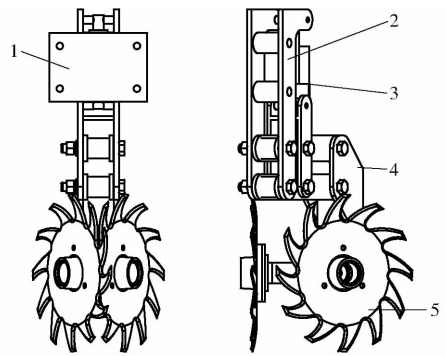


图1 星齿凹面盘式清秸防堵装置结构简图

Fig.1 Structure diagram of star-toothed concave disk row cleaners

1. 固定架 2. 平行四杆架 3. 作业深度调节推杆 4. 清秸盘安装架 5. 星齿凹面清秸盘

1.2 工作原理

该清秸防堵装置安装在免耕播种单体的正前方,沿着拖拉机的前进方向运动。作业前,通过作业深度调节推杆调节清秸盘星齿的入土深度,使星齿穿过秸秆残茬层并切入恒定深度的土壤层。作业时,清秸盘在机具的拉力和土壤的反作用力共同形成的力偶作用下绕定轴被动转动,星齿沿切刃方向自远及近逐渐切入秸秆残茬层和土壤层,对其正下方秸秆和土壤进行切削破碎,各星齿顺次切削以保证清秸防堵装置作业深度的稳定性;清秸盘外侧的秸秆残茬沿着外表面向苗带两侧运动,且秸秆横向移动距离逐渐增加,当秸秆运动到清秸盘与地面交接的末端时,秸秆在合力的作用下,沿着星齿部分凹曲面的切线方向被侧向抛出;被抛掷的秸秆在惯性力和自身重力的作用下落在所清理苗带的两侧,形成一条清洁的播种区域。随后,播种单体在所形成的苗带上进行播种。

2 星齿凹面盘式清秸防堵装置设计

2.1 清秸防堵作业运动学分析

将田间的粉碎秸秆视为散粒体,对其进行力学分析。认为在苗带清秸过程中清秸盘的前进速度和转速为匀速运动,作业深度保持稳定^[18-19]。如图2所示建立空间直角坐标系 $Oxyz$, x 轴为清秸防堵装置作业时前进方向, y 轴为水平面内与 x 轴垂直方向, z 轴为竖直方向。分析秸秆颗粒脱离清秸盘瞬时的受力情况,包括秸秆颗粒受到的盘面瞬时支持力 N (与清秸盘垂直平面夹角为 γ)、秸秆颗粒受到的盘面摩擦力 f (清秸盘平面上被考察点的切线方向)和其自身重力 G 。秸秆颗粒受到的合力为 F ,方向与其绝对运行方向相同。

将支持力 N 和摩擦力 f 向坐标轴方向进行分

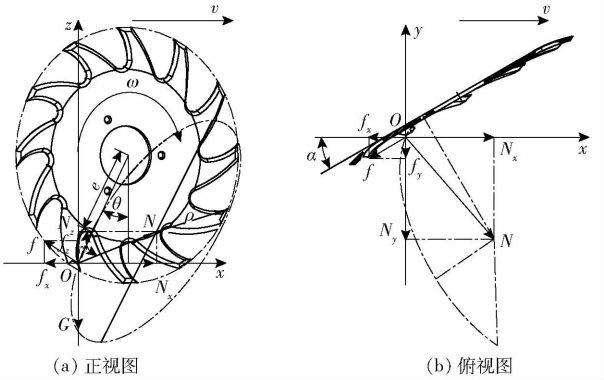


图2 秸秆颗粒在清秸盘面运动简图
Fig.2 Kinematic diagrams of straw particles at surface of disc row cleaner

解,则秸秆颗粒沿坐标轴方向的运动微分方程为

$$\begin{cases} N\sin\gamma\sin\theta\sin\alpha - f\cos\theta\cos\alpha = m \frac{d^2x}{dt^2} \\ N\cos\gamma\cos\alpha + f\sin\theta\sin\alpha = m \frac{d^2y}{dt^2} \\ N\sin\gamma\cos\theta + f\sin\theta - mg = m \frac{d^2z}{dt^2} \\ f = N\tan\varphi \end{cases} \quad (1)$$

- 式中 m ——秸秆颗粒质点质量,kg
 g ——重力加速度,m/s²
 t ——秸秆脱离清秸盘的时间,s
 γ ——秸秆颗粒受到的盘面瞬时支持力与清秸盘垂直平面夹角,(°)
 θ ——清秸盘圆心和其与土壤交点的连线与竖直方向的夹角,(°)
 α ——清秸盘平面与前进方向夹角,(°)
 φ ——秸秆颗粒与清秸盘间摩擦角,(°)

由式(1)可得

$$\begin{cases} v_x = \frac{Nt}{m}(\sin\gamma\sin\theta\sin\alpha - \tan\varphi\cos\theta\cos\alpha) \\ v_y = \frac{Nt}{m}(\cos\gamma\cos\alpha + \tan\varphi\sin\theta\sin\alpha) \\ v_z = \frac{Nt}{m}(\sin\gamma\cos\theta + \tan\varphi\sin\theta) - gt \end{cases} \quad (2)$$

- 式中 v_x 、 v_y 、 v_z ——秸秆颗粒在 x 、 y 、 z 轴方向分速度,m/s

由式(2)可知,影响秸秆颗粒脱离速度的主要外界因素是 α 、 θ 、 γ 。

由清秸盘的结构可知

$$\begin{cases} \theta = \arccos \frac{\sqrt{r^2 - h^2}}{r} \\ \gamma = \arcsin \frac{q}{\rho} \\ q = r - e \end{cases} \quad (3)$$

- 式中 r ——清秸盘回转半径,mm

- h ——清秸盘入土深度,mm
 e ——偏心距,mm
 ρ ——曲率半径,mm
 q ——圆盘曲面投影长度,mm

由式(3)可知,影响秸秆颗粒速度的清秸盘结构参数为清秸盘回转半径 r 、圆盘曲面投影长度 q 和曲率半径 ρ 。

2.2 清秸盘结构参数的确定

2.2.1 圆盘曲面

2.2.1.1 清秸盘回转半径 r

图3为清秸盘作业时安装示意图。

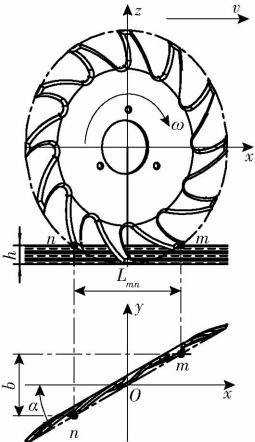


图3 清秸盘安装示意图
Fig.3 Working diagram of disc row cleaner

清秸盘平面与前进方向夹角为 α ,因此,单个清秸盘的有效清秸宽度为

$$b = L_{mn}\sin\alpha \quad (4)$$

其中 $L_{mn} = \sqrt{r^2 - (r - h)^2} \quad (5)$

- 式中 b ——清秸盘有效清秸幅宽,mm

L_{mn} ——清秸盘与土壤接触的有效长度,mm

为了消除两个清秸盘间的漏清区,将清秸盘前后交错配置,如图4所示。

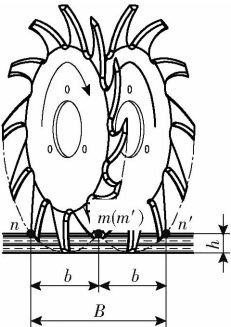


图4 清秸防堵装置理论幅宽示意图
Fig.4 Sketch of theoretical width of row cleaners

因此,清秸防堵装置形成的理论幅宽为

$$B = 2b = 4\sin\alpha \sqrt{r^2 - (r - h)^2} = 4\sin\alpha \sqrt{rh - h^2} \quad (6)$$

式中 B ——清秸防堵装置理论幅宽,mm

根据星齿部分深入秸秆层及土层深度要求,按照经验公式^[18]计算

$$D = 2r = KH \tag{7}$$

式中 D ——清秸盘直径,mm

K ——径深比(选取范围为 3~5,设计时有效作业深度大取小值,反之取大值)

H ——星齿深入秸秆及土层深度,mm

清秸盘直径还要满足结构要求

$$D > 2H + c \tag{8}$$

式中 c ——连接法兰盘最大外径,mm

2.2.1.2 曲率半径 ρ 和圆盘曲面投影长度 q

如图 5 所示,清秸盘回转半径确定后,清秸盘的凹面结构由曲率半径 ρ 和圆盘曲面投影长度 q 共同决定。研究表明^[20],增加星齿部分的曲率和减小圆盘曲面投影长度均能加强清洁盘对秸秆的侧推和抛掷性能,但是曲率过大或圆盘曲面投影长度过小将使作业阻力增加。因此,曲率半径 ρ 和圆盘曲面投影长度 q 为影响清秸盘作业质量的重要结构参数。

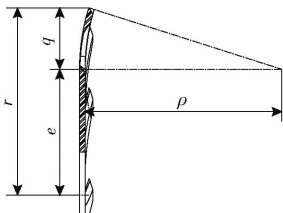


图 5 清秸盘凹面结构示意图

Fig. 5 Schematic of disc row cleaner

综合上述分析,根据东北地区采用免耕覆盖种植模式进行播种作业时的田间实际情况,以及玉米免耕播种机清秸防堵装置的安装结构参数进行本装置的结构参数设计。根据玉米免耕播种作业技术要求,免耕播种机作业时对土壤扰动需小于田面的 30%,且应为播种作业准备出 15~25 cm 的播种区^[1]。东北地区玉米常规垄距为 650 mm,春季播种时覆盖在地表的秸秆层厚度为 40~50 mm,为使清秸轮转动效率高,设清秸盘入土深度 h 为 20 mm,选取径深比 K 为 5,清秸盘法兰盘结构尺寸 c 为 120 mm,清秸盘平面与前进方向夹角 α 为 30°^[16]。综合以上设计要求,经过计算,确定取值范围为 150 mm ≤ r ≤ 180 mm、30 mm ≤ q ≤ 70 mm、160 mm ≤ ρ ≤ 190 mm。

2.2.2 圆盘星齿

2.2.2.1 星齿刃口曲线

结合上述设计的凹面圆盘结构特点可知,星齿的刃口曲线是在凹面部分的空间曲线。为了简化问题,采用在清秸盘展开面内的偏心圆的一段圆弧作为刃口曲线,如图 6 中 $\widehat{AB}$ 所示。

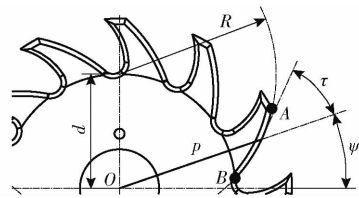


图 6 星齿刃口曲线示意图

Fig. 6 Diagram of star-toothed edge curve

星齿刃口曲线的参数方程为

$$\rho^2 - 2d\rho\sin\psi = R^2 - d^2 \tag{9}$$

式中 ρ ——切刃上任一点到清秸盘圆心距离,mm

d ——切刃的偏心距,mm

ψ ——过切刃上任一点和清秸盘圆心连线与水平方向夹角,(°)

R ——切刃的偏心圆半径,mm

因此, $\widehat{AB}$ 段的滑切角 τ 为

$$\tau = \arccos\left(\frac{d}{R}\cos\psi\right) \tag{10}$$

清秸盘在工作过程中,星齿刃口部分会对玉米秸秆和土壤进行切削。因此,应保证刃口部分的滑切角大于金属与土壤间的摩擦角(23°~45°)^[21]以及金属与秸秆间的摩擦角(23°~33°)^[22]。由式(10)可知, d/R 值选定后,在 0° < ψ < 90°范围内,滑切角 τ 随 ψ 的增大而增大。若 ψ 为常数时,滑切角 τ 随 d/R 值增加而减小。为了保证 $\widehat{AB}$ 段曲线有好的滑切性能, d/R 值应尽量选小些,但是 d/R 选太小弧线和悬臂很长,根部刚度差。相关研究^[20]指出, $d/R = 0.74$ 具有较好的滑切作业性能,本文选取 $d/R = 0.74$ 。

2.2.2.2 星齿数量

星齿布置如图 7 所示,为保证星齿对地表的粉碎秸秆具有连续的拨动和抛掷作用,同时避免两星齿根部出现夹秆现象,按照农业机械设计手册^[18]要求计算星齿数量

$$i = \frac{2\pi(r-q)}{s} \tag{11}$$

式中 s ——相邻齿根弦长,应略大于秸秆直径,mm

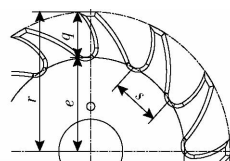


图 7 星齿数量计算简图

Fig. 7 Diagram of star-toothed number calculation

由式(11)可知,星齿数量 i 与回转半径 r 、圆弧投影长度 q 有关,因此需根据不同结构参数确定清秸盘星齿的数量。

2.3 清秸盘安装架设计

清秸盘工作参数的变化影响清秸防堵装置的作业质量。由于作业环境地表不平、坚实度不一致和秸秆量不均匀等,使清秸防堵装置在作业过程中产生竖直方向的位移变化。如图 8a 所示,平面爪轮式清秸防堵装置铰接在播种单体上,当清秸盘竖直方向位移变化量为 Δh 时,清秸盘的安装倾角变化量为 $\Delta\beta$,改变了清秸防堵装置设定的最优工作参数,影响苗带清秸质量。针对此问题,本文运用平行四杆机构设计清秸盘的安装架,如图 8b 所示,可使清秸盘始终保持设置的工作参数运行,避免因地况的变化导致清秸质量的下降。

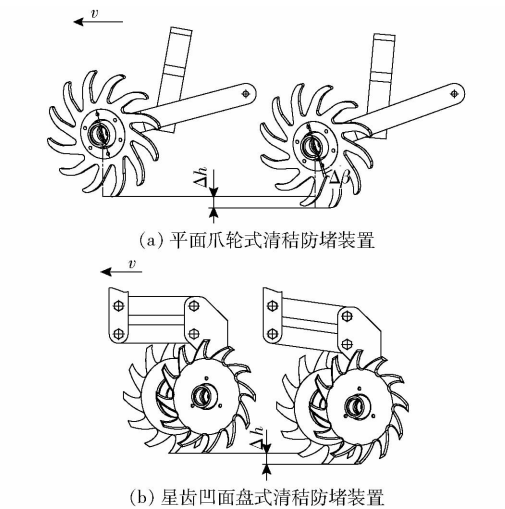


图 8 清秸防堵装置工作参数随深度变化示意图
Fig.8 Sketches of working parameters changed with working depth

3 离散元仿真

运用离散元仿真软件 EDEM 建立作业部件-土壤-秸秆间作用模型,以苗带清秸率和作业阻力为主要评价指标,模拟清秸防堵装置田间作业环境,分析影响清秸防堵装置作业性能的主要因素,寻求最优结构参数组合,为后续田间试验奠定基础。

3.1 离散元模型建立

3.1.1 清秸防堵装置模型

为合理有效地进行仿真模拟与计算,对清秸防堵装置模型进行简化处理,去除其工作过程中无关的部件。运用三维制图软件 Creo 对清秸防堵装置进行实体建模(比例 1:1),以 .igs 格式导入 EDEM 软件 Geometry 项中,仿真模型如图 9 所示。设置仿真模型的材质属性为 45 号钢,泊松比为 0.31,剪切模量为 7.0×10^{10} Pa,密度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$ 。

3.1.2 土槽模型

为简化模型,缩短仿真时间,采用直径为 8 mm 的球体作为土壤颗粒模型^[23-24],设定土壤颗粒力学

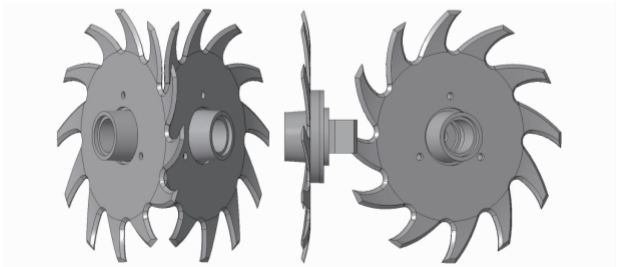


图 9 星齿凹面清秸盘几何模型
Fig.9 Geometric model of row cleaners

关系模型为 Hertz - Mindlin with bonding 模型,剪切模量为 1.0×10^6 Pa,密度为 $1\,850\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.38;根据粉碎秸秆的实际尺寸,采用 8 个直径为 20 mm、球心间距为 10 mm 的球体组成的长为 90 mm 的长线性模型作为秸秆颗粒模型,设定秸秆颗粒力学关系模型为 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型,泊松比为 0.4,剪切模量为 1.0×10^6 Pa,密度为 241 kg/m^3 。根据文献[24]得到仿真材料的接触参数如表 1 所示。

表 1 仿真材料接触参数			
Tab.1 Material contact parameters of simulation			
参数	45 号钢- 土壤颗粒	45 号钢- 秸秆颗粒	土壤颗粒- 土壤颗粒
动摩擦因数	0.04	0.01	0.25
静摩擦因数	0.50	0.30	0.40
恢复系数	0.28	0.30	0.20

为模拟实际田间清秸作业状态,运用 EDEM 软件建立虚拟土槽,根据该地区春季播种前田间秸秆覆盖情况,设定土壤层厚度为 50 mm,秸秆层厚度为 40 mm,设置土槽尺寸(长×宽×高)为 2 000 mm×650 mm×100 mm,将其设定为虚拟颗粒工厂,保证槽内存有充足颗粒进行仿真,如图 10 所示。在生成土壤颗粒过程中,使其仅在重力作用下自由沉降,且整体生成后在颗粒群上方加载校准土壤密度所需的垂直载荷,进行土壤模型压实,使仿真与实际土壤一致。

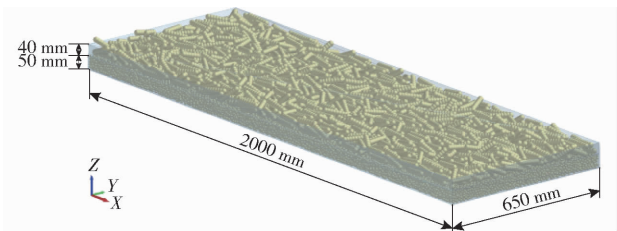


图 10 虚拟土槽模型
Fig.10 Virtual model of bench

3.2 虚拟仿真过程

在虚拟仿真过程中,设置清秸防堵装置位于土槽一侧进行初始作业。根据机具实际作业状态及免

耕播种农艺要求,设置该装置前进速度为 2.22 m/s、清秸盘入土深度为 20 mm。为保证仿真的连续性,设置其固定时间步长为 Rayleigh 时间步长的 15%,总时间为 7 s,网格尺寸设置为土壤颗粒尺寸的 2 倍,以便对后续数据精准处理。仿真过程如图 11 所示。

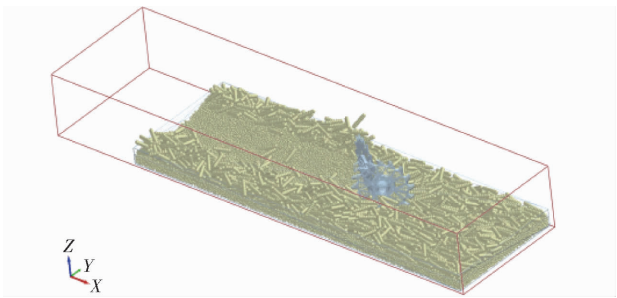


图 11 清秸作业 EDEM 仿真

Fig. 11 EDEM simulation processes of strap row clearing

4 EDEM 虚拟仿真试验

4.1 虚拟仿真试验设计

为研究清秸防堵装置作业质量与作业阻力变化规律,分析影响苗带清秸作业性能的主要因素,得到理想结构参数组合,进行 EDEM 虚拟仿真正交试验研究。根据理论分析结果,确定清秸盘回转半径、曲率半径和圆盘曲面投影长度为试验因素,以作业后苗带清秸率和作业阻力为试验指标,采用三因素三水平 Box - Behnken 设计试验确定清秸盘最佳参数组合^[25-26],试验因素和编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码

Tab.2 Coding of experimental factors

编码	因素		
	回转半径	曲率半径	圆盘曲面投影长度
	r/mm	ρ/mm	q/mm
-1	152.5	160	30
0	165.0	175	50
1	177.5	190	70

4.2 试验指标

由于目前国内外尚无评价苗带清秸作业质量的统一标准,通过查阅相关资料并结合实际玉米免耕播种作业技术要求^[27-28],选取苗带清秸率为试验的评价指标,同时考察该装置在工作过程中的作业阻力。

(1) 苗带清秸率

利用 EDEM 软件的 solve report 模块,可以得到建立的秸秆颗粒在仿真作业前后的数量变化,提取作业前后线框区域内秸秆颗粒数量,如图 12 所示。

对苗带区域内部清洁率进行计算

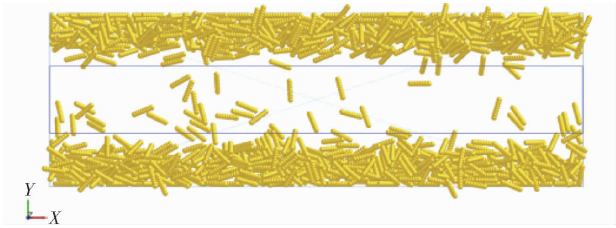


图 12 清秸率测试区域示意图

Fig. 12 Schematic of clearing rate test area

$$C = \left(1 - \frac{S_1}{S}\right) \times 100\%$$
 (12)

式中 C——苗带清秸率,%
S₁——仿真作业后秸秆数量
S——仿真作业前秸秆数量

(2) 作业阻力

运用 EDEM 软件的 Analyst 项的 Graph 模块,获取清秸轮作业过程中的实时受力数据,如图 13 所示,计算其在稳定工作阶段的受力平均值作为试验结果。

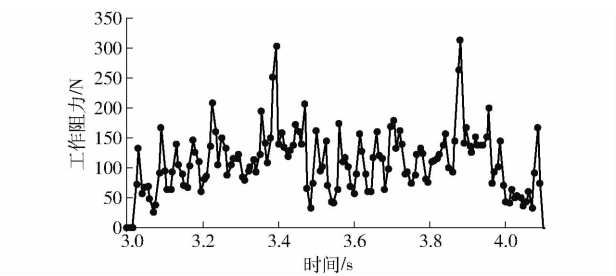


图 13 清秸轮受力随时间变化曲线

Fig. 13 Force-time chart of row cleaner

4.3 试验结果分析与优化

虚拟试验操作值与参数设计值无误差,可根据数据进行结果分析,具体试验方案与结果如表 3 所示,x₁、x₂、x₃为因素编码值。

通过 Design-Expert 软件对试验数据进行回归分析和因素方差分析,筛选出影响显著因素,从而得出清秸率 y₁和作业阻力 y₂的回归方程

$$y_1 = 85.34 - 0.92x_1 - 2.37x_2 - 1.31x_3 + 0.81x_1x_2 + 1.29x_2x_3 + 1.84x_2^2 + 0.82x_3^2$$
 (13)

$$y_2 = 126.78 + 6.54x_1 - 4.25x_2 - 4.61x_3 + 4.63x_1x_3 - 10.40x_2x_3 - 5.90x_1^2 - 3.68x_2^2 - 6.05x_3^2$$
 (14)

为直观分析试验因素与指标间关系,运用 Design-Expert 软件得到响应曲面图,如图 14 所示。

根据上述回归方程和响应曲面图可知,清秸轮回转半径和曲率半径间对清秸率存在交互作用,如图 14a 所示,其中曲率半径比回转半径对清秸率的影响显著;当回转半径一定时,清秸率随曲率半径增加而降低;当曲率半径一定时,清秸率随回转半径增加而降低。曲率半径和圆盘曲面投影长度间对清秸率和作业阻力均存在交互作用,如图 14b、14d 所示,

表3 试验方案与结果

Tab.3 Schemes and results of tests

试验序号	试验因素			试验指标	
	回转半径	曲率半径	圆盘曲面投影长度	苗带清秸率	作业阻力
	x_1	x_2	x_3	$y_1/\%$	y_2/N
1	-1	-1	0	91.75	112.0
2	1	-1	0	87.60	130.2
3	-1	1	0	85.32	108.5
4	1	1	0	84.40	118.1
5	-1	0	-1	87.69	119.8
6	1	0	-1	87.00	122.8
7	-1	0	1	85.94	97.6
8	1	0	1	84.37	119.1
9	0	-1	-1	93.15	114.0
10	0	1	-1	85.90	125.6
11	0	-1	1	87.50	129.3
12	0	1	1	85.42	99.3
13	0	0	0	85.44	129.2
14	0	0	0	84.83	128.8
15	0	0	0	85.38	124.9
16	0	0	0	85.25	127.2
17	0	0	0	85.79	123.8

其中曲率半径比圆盘曲面投影长度对清秸率和作业阻力的影响显著;当曲率半径一定时,清秸率随圆盘曲面投影长度增加而降低,作业阻力随圆盘曲面投影长度的增加而下降;当圆盘曲面投影长度一定时,清秸率随曲率半径增加而降低,作业阻力随曲率半径的增加而下降。回转半径和圆盘曲面投影长度间对作业阻力存在交互作用,如图14c所示,其中圆盘曲面投影长度比回转半径对作业阻力的影响显著;

当回转半径一定时,作业阻力随圆盘曲面投影长度增加而降低;当圆盘曲面投影长度一定时,作业阻力随回转半径增加而升高。分析上述影响规律产生的原因可知,增大清秸盘的回转半径,降低了清秸盘的转动速度,减弱了清秸盘对秸秆的抛掷作用,从而使清秸率下降;同时,增加了清秸盘在相同作业深度条件下的有效作业面积,从而使作业阻力上升。增大曲率半径,降低了其对秸秆的抛掷速度,减小了清秸盘的有效作业面积,从而使清秸率和作业阻力均下降。增大圆盘曲面投影长度,增大了相邻星齿的间距,使作业过程中漏清的几率增加,同时减小了清秸盘有效作业面积,从而使清秸率和作业阻力均降低。

为得到该清秸防堵装置最优结构参数组合,对试验因素进行优化设计,遵循提高苗带清秸率、降低作业阻力的原则,采用多目标变量优化方法,结合试验因素边界条件,建立非线性规划参数模型为

$$\begin{cases} \max y_1(r,\rho,q) \\ \min y_2(r,\rho,q) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 152.5\text{ mm}\leq r\leq 177.5\text{ mm} \\ 160\text{ mm}\leq \rho\leq 190\text{ mm} \\ 30\text{ mm}\leq q\leq 70\text{ mm} \end{cases} \end{cases}$$

(15)

基于 Design-Expert 软件中的多目标参数优化 (Optimization) 模块对数学模型进行分析求解,从优化结果中选取一组合理参数组合,即当清秸盘回转半径为 152.5 mm,曲率半径为 160 mm,圆盘曲面投影长度为 50.9 mm 时,清秸防堵装置作业性能较理想,其清秸率为 91.2%,作业阻力为 112.8 N。根据所优化的结果进行虚拟仿真验证,其清秸率为

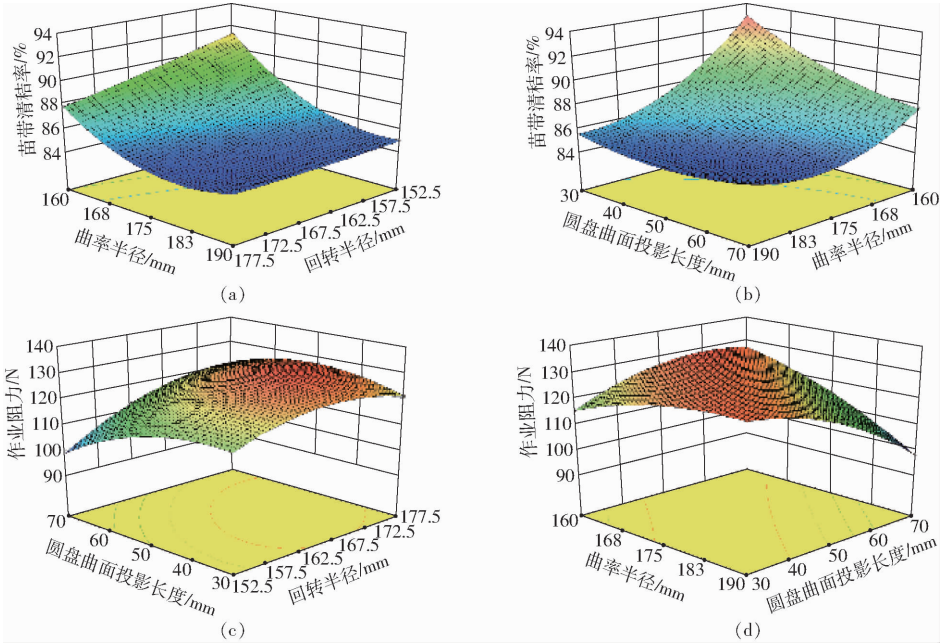


图14 各因素对指标影响的响应曲面

Fig.14 Response surfaces of each factor on index

92.1% ,作业阻力为 114.2 N ,与优化结果基本一致。

5 田间试验

为验证星齿凹盘式清秸防堵装置在田间作业时的工作性能,于 2018 年 10 月在吉林大学农学部试验田进行田间试验。试验田的土壤类型为东北黑钙土,试验地前茬作物为玉米,秋季采用自走式玉米收获机收获的同时将全量秸秆进行粉碎还田处理。试验期间日平均气温为 12 ~ 16℃ ,无降雨。表 4 为试验时田间地况的主要参数。

表 4 田间试验主要参数

Tab.4 Main parameters of field trials

	参数	数值
地表秸秆	粉碎长度/mm	50 ~ 150
	留茬高度/mm	50 ~ 100
	单位覆盖量/(kg·m ⁻²)	1.4
	含水率/%	50
0 ~ 100 m 土壤层	坚实度/MPa	0.985
	含水率/%	24.6
	容积密度/(g·cm ⁻³)	1.21
	温度/℃	11.8

加工试制星齿凹面盘式清秸防堵装置,清秸盘的结构参数选取优化后的结果:清秸盘回转半径为 152.5 mm,曲率半径为 160 mm,圆盘曲面投影长度为 50.9 mm。星齿凹面盘式清秸防堵装置安装在带有限深地轮的三点悬挂架上,通过悬挂架与拖拉机相连,同时在悬挂架上安装平面爪轮式清秸防堵装置作为对照。试验前,将两清秸防堵装置的清秸盘(轮)调至同一水平高度,调节拖拉机的上、下拉杆保证机架与地面保持水平,并调整清秸盘的入土深

度为 20 mm。试验时,控制拖拉机的前进速度为 2.22 m/s(8 km/h) ,测试区域为 50 m。田间试验现场如图 15 所示。



图 15 田间试验现场

Fig.15 Platform experiment

每次试验结束后,对苗带清秸率和苗带清秸宽度进行测量,测试点为稳定工作区内间隔 2 m 的连续 10 个测点,使用电子天平称量苗带清秸宽度内的残留秸秆质量,并与该区域内试验前秸秆质量作比值,计算苗带清秸率;使用钢尺对测点的苗带清秸宽度进行测量。每次试验过程中,通过六分力测试系统分别对两种防堵装置的作业阻力进行测定。试验重复 3 次,测试结果取平均值作为试验结果,试验效果和测量过程如图 16 所示,相关数据结果如表 5 所示。

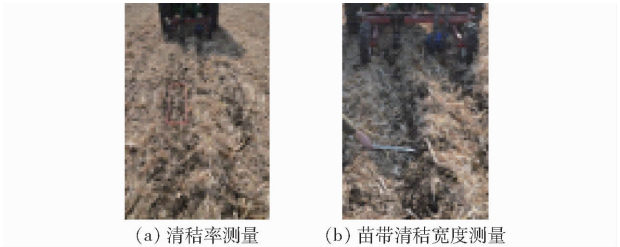


图 16 作业效果及测量指标

Fig.16 Operation effect and measurement index

表 5 田间试验结果

Tab.5 Test results

装置类型	苗带清秸率/%		苗带清秸宽度/mm		作业阻力/N	
	测量值	平均值	测量值	平均值	测量值	平均值
星齿凹面盘式清秸防堵装置	93.4		251.7		146.4	
	91.3	92.2	235.5	242.5	137.7	142.6
	91.9		240.3		143.6	
平面爪轮式清秸防堵装置	72.4		178.5		182.7	
	75.8	72.3	186.2	179.0	197.5	185.5
	68.7		172.4		176.4	

由表 5 可知,在相同工况下星齿凹面盘式清秸防堵装置田间的苗带清秸率为 92.2% ,作业阻力为 142.6 N,苗带清秸宽度为 242.5 mm,均优于平面爪轮式清秸防堵装置,且苗带清秸率提升效果显著 ($P < 0.01$)。分析对比试验结果可知,清秸盘的凹面结构提高了粉碎秸秆的抛掷初速度,使秸秆更利

于被分到苗带两侧;星齿凹面盘式清秸防堵装置的两个清秸盘相交错重叠,消除了清秸盘间的漏清区,使工作幅宽内的秸秆得到充分的清理;星齿凹面盘的切刃更易于切断秸秆和切入土壤,提高了作业深度和苗带清秸宽度的稳定性;平行四杆架维持清秸盘的工作参数,提高作业稳定性。通过与仿真试验

结果进行对比分析可知,田间苗带清秸作业质量与仿真试验优化结果基本一致,但是实际作业阻力高于仿真结果,产生误差的原因可能是仿真环境过于理想,而田间土壤的含水率和容积密度更大,增加了作业阻力,但误差在可接受范围内。田间试验结果表明,星齿凹盘防堵装置达到很好的作业效果,清理的苗带满足免耕播种作业的农艺要求。

6 结论

(1)设计了一种新型星齿凹面盘式清秸防堵装置,能够在玉米秸秆全量粉碎还田地进行高效的清秸防堵作业,清秸率高,工作性能稳定,作业后地表满足免耕播种机播种作业要求。

(2)通过对秸秆在清秸盘表面的运动过程进行理论分析,得出影响清秸防堵装置作业性能的结构参数为清秸盘回转半径 r 、圆盘曲面投影长度 q 和曲

率半径 ρ ,通过理论分析和数值计算确定了各结构参数的取值范围为 $150\text{ mm} \leq r \leq 180\text{ mm}$ 、 $30\text{ mm} \leq q \leq 70\text{ mm}$ 、 $160\text{ mm} \leq \rho \leq 190\text{ mm}$ 。

(3)以清秸盘回转半径、曲率半径和圆盘曲面投影长度为试验因素,以苗带清秸率、作业阻力为试验指标,采用虚拟正交试验方法建立了因素与指标间数学模型,运用 Design-Expert 软件对试验结果进行处理,采用多目标变量优化方法建立了优化模型,得出被动式星齿凹盘防堵装置的最优结构参数:清秸盘回转半径为 152.5 mm 、曲率半径为 160 mm 、圆盘曲面投影长度为 50.9 mm 。

(4)田间对比试验结果表明,星齿凹盘防堵装置清秸率为 92.2% ,苗带清秸宽度为 242.5 mm ,作业阻力为 142.6 N ,其综合作业性能优于平面爪轮式防堵装置,清理的苗带满足免耕播种作业的农艺和技术要求。

参 考 文 献

- [1] 贾洪雷,马成林,李慧珍,等. 基于美国保护性耕作分析的东北黑土区耕地保护[J]. 农业机械学报,2010,41(10):28-34.
JIA Honglei, MA Chenglin, LI Huizhen, et al. Tillage soil protection of black soil zone in northeast of China based on analysis of conservation tillage in the United States[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 28-34. (in Chinese)
- [2] BLEVINS R L, THOMAS C W, SMITH M S, et al. Changes in soil properties after 10 years continuous no-tilled and conventionally tilled corn[J]. Soil and Tillage Research, 1983, 3(2): 123-132.
- [3] CHASTIN T G, WARD K J, WYSOCKI D J. Stand establishment response of soft winter wheat to seed bed residue and seed size[J]. Crop Science, 1995, 35(1): 213-218.
- [4] 农业部农业机械化推广司. 中国保护性耕作[M]. 北京:中国农业出版社,2008.
- [5] 赵佳乐,贾洪雷,郭明卓,等. 免耕播种机有支撑滚切式防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(10):18-28.
ZHAO Jiale, JIA Honglei, GUO Mingzhuo, et al. Design and experiment of supported roll-cutting anti-blocking mechanism with for no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 18-28. (in Chinese)
- [6] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180401&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] SIEMENS M C, WILKINS D E, CORREA R F. Development and evaluation of a residue management wheel for hoe-type no till drills[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(2): 397-404.
- [9] TOURN M, SOZA E, BOTTA G, et al. Direct corn seeding. Effect of residue clearance on implant efficiency[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2003,1(3): 99-103.
- [10] MORRIS N L, MILLER P C H, ORSON J H, et al. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and environment-a review[J]. Soil and Tillage Research, 2010,108(1-2): 1-15.
- [11] CELIK A, ALTIKAT S, WAY R T. Strip tillage width effects on sunflower seed emergence and yield[J]. Soil and Tillage Research, 2013,131:20-27.
- [12] 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)
- [13] RAOUFAT M H, MATBOORI A. Row cleaners enhance reduced tillage planting of corn in Iran[J]. Soil and Tillage Research, 2007,93(1): 152-161.
- [14] FALLAHI S, RAOUFAT M H. Row-crop planter attachments in a conservation tillage system: a comparative study[J]. Soil and Tillage Research, 2008,98(1): 27-34.

- [15] 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 Weihai, 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)
- [16] 林静,李宝筏,李宏哲. 阿基米德螺线型破茬开沟和切拔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)
- [17] 贾洪雷,刘行,余海波,等. 免耕播种机凹面爪式清茬机构仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):68-77.
JIA Honglei, LIU Hang, YU Haibo, et al. Simulation and experiment on the stubble clearance mechanism with concave claw-type for no-tillage planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):68-77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.008. (in Chinese)
- [18] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- [19] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982:389-403.
- [20] 张才权. 水田耙星形耙片几何参数的研究[J]. 农业机械学报,1979,10(2):85-95.
ZHANG Caiquan. Research of geometric parameters of star-shape disc for paddy field harrow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(2): 85-95. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] ZHAO Jiale, HUANG Dongyan, JIA Honglei, et al. Analysis and experiment on cutting performances of high-stubble mazize stalks[J]. The International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2017, 10(1):40-52.
- [23] 王金武,唐汉,王金峰,等. 悬挂式水田单侧修筑埂机数值模拟分析与性能优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(8):72-80.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Numerical analysis and performance optimization experiment on hanging unilateral ridger for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 72-80. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170807&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.007. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 任露泉. 试验设计及其优化[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [26] 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [27] NY/T 1628—2008 玉米免耕播种机作业质量[S]. 2008.
- [28] NY/T 1768—2009 免耕播种机质量评价技术规范[S]. 2009.

(上接第56页)

- [21] 孙伟,刘小龙,石林榕,等. 刮板升运带式膜上覆土装置覆土特性[J]. 机械工程学报,2016,52(7):38-45.
SUN Wei, LIU Xiaolong, SHI Linrong, et al. Covering soil on plastic-film characteristics of scraper lifting belt mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering,2016,52(7): 38-45. (in Chinese)
- [22] ZENG Zhiwei, CHEN Ying, ZHANG Xirui, et al. Modelling the interaction of a deep tillage tool with heterogeneous soil[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143: 130-138.
- [23] 戴飞,赵武云,宋学锋,等. 提土-全膜面覆土装置作业参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):88-96.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SONG Xuefeng, et al. Operating parameter optimization and experiment of device with elevating and covering soil on plastic-film[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 88-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.011. (in Chinese)
- [24] 袁雪,祁力钧,王虎,等. 温室摇摆式变量弥雾机喷雾参数响应面法优化[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(4):45-50.
YUAN Xue, QI Lijun, WANG Hu, et al. Spraying parameters optimization of swing, automatic variables and greenhouse mist sprayer with response surface method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 45-50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120410&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.010. (in Chinese)