

水稻秸秆双轴深埋还田机设计与试验

王金峰 杨东泽 王震涛 付佐栋 王金武 翁武雄
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对北方寒地稻田在秸秆还田作业时,传统单轴机具难以适应覆有大量秸秆的湿黏土壤条件,作业质量难以满足实际作业需求的问题,设计了一种前轴正旋、后轴反旋的新型水稻秸秆双轴深埋还田机。结合实际农艺要求及土壤运动过程确定前后刀轴中心水平距离 650 mm、竖直距离 100 mm,并对整机进行配置。运用 EDEM 仿真软件模拟还田机工作过程,以前进速度、前轴转速、后轴转速为试验因素,以秸秆还田率和机具功耗为评价指标进行正交试验,建立秸秆还田率及机具功耗回归方程。利用 Design-Expert 分析软件得到最优参数组合,根据仿真优化结果及实际加工需求确定最优工作参数为:前进速度 1.5 km/h、前轴转速 274.2 r/min、后轴转速 219.4 r/min,为后续田间试验提供理论支撑。田间试验结果表明,在留茬高度为 15~20 cm、地表秸秆覆盖量为 468~578 g/m²、拖拉机前进作业速度为低速 1 挡(1.5 km/h)时,水稻秸秆双轴深埋还田机还田率为 88.7%~91.2%、地面平整度为 1.8~2.4 cm、碎土率为 97.7%~98.8%、耕深为 16.6~19.5 cm,各项指标均满足农艺要求;与传统单轴机具相比,水稻秸秆双轴深埋还田机提高了秸秆还田率、碎土率,同时未见机具前方壅土现象。

关键词: 水稻秸秆; 秸秆还田; 双刀轴; 离散元仿真; 田间试验

中图分类号: S233.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)04-0021-10 OSID: 

Design and Experiment of Rice Straw Biaxial Deep-buried Returning Machine

WANG Jinfeng YANG Dongze WANG Zhentao FU Zuodong WANG Jinwu WENG Wuxiong
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In view of the problems that traditional single-axis machines are difficult to adapt to the wet and clay soil conditions covered with a large amount of straw when straw is returned to the rice field in the northern cold region, the problem that the quality of work is difficult to meet the needs of actual work. A type of rice straw double-shaft deep-buried returning machine with forward rotation of the front shaft and reverse rotation of the rear shaft was designed. Combined with the actual agronomic requirements and the soil movement process, the horizontal distance between the center of the front and rear knife shafts was 650 mm and the vertical distance was 100 mm, and the whole machine was configured. The EDEM simulation software was used to simulate the working process of the field returning machine. Taking the forward speed, front axle speed and rear axle speed as the test factors, and taking the straw returning rate and the power consumption of the machine as the evaluation indicators, an orthogonal test was carried out to establish the straw returning rate and the machine tool power consumption regression equation. Design-Expert analysis software was used to obtain the optimal parameter combination, and the optimal working parameters were determined according to the simulation optimization results and actual processing requirements: forward speed was 1.5 km/h, front axle speed was 274.2 r/min, rear axle speed was 219.4 r/min, providing theoretical support for subsequent field experiments. The field test results showed that when the stubble height was 15~20 cm, the surface straw coverage was 468~578 g/m², and the forward working speed of the tractor was the first gear of low speed (1.5 km/h), the rice straw biaxial deep burial returning machine can still be used. The field rate was 88.7%~91.2%, the ground flatness was 1.8~2.4 cm, the broken soil rate was 97.7%~98.8%, and the tillage depth was 16.6~19.5 cm. All indicators met the agronomic requirements, which improved the straw returning rate and the broken soil rate, at the same time, there was no phenomenon of stagnant soil in front of the machine.

Key words: rice staw; straw returning; double shaft; discrete element simulation; field test

收稿日期: 2022-08-11 修回日期: 2022-09-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(32071910)和国家重点研发计划项目(2021YFD200060502)
作者简介: 王金峰(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械研究,E-mail: jinfeng_w@126.com
通信作者: 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械及机械可靠性研究,E-mail: jinwuw@163.com

0 引言

随着农村现代化的推进和农民生活水平的提高,农作物秸秆的大规模废弃焚烧已成为中国农业污染的重要来源^[1]。为避免秸秆大规模焚烧污染,充分开发利用农作物秸秆资源,提出将秸秆直接还田用作肥料^[2]。秸秆直接还田技术是东北地区重点推广技术,主要通过农业机械将收获后秸秆粉碎并抛撒在田间后耕翻掩埋,或将整株秸秆及高留茬秸秆直接翻埋于土壤深层^[3-5]。

水稻秸秆还田机作为东北地区水稻秸秆直接还田的作业机具,主要以单轴为主^[6-8],黑龙江地区在秸秆还田作业时,地面秸秆量大,传统单轴机具难以适应覆有大量秸秆的湿黏土壤条件,作业质量难以满足实际作业需求的问题影响着机具作业效果。基于以上的分析,为提高作业品质,改善上述问题,拟探寻一种新的还田方式,研究设计一种适用于北方寒地水稻的双轴秸秆深埋还田机。

许多研究团队已提出双轴还田机的设计理念。李永磊等^[9]初步探索了还田机械双轴配置作业模式,并设计了针对江苏稻麦轮作区麦秆全量还田的SGTN-180型旋耕埋草施肥联合作业机,前轴正旋采用L形旋耕弯刀、后轴反旋采用IIT225型旋耕刀,一次性完成秸秆粉碎还田、旋耕碎土、施肥等多项工作。胡建平等^[10]基于离散元的分析方法建立了双轴作业模式下功耗的预测模型,并通过田间试验对模型进行验证,试验结果表明功耗预测模型适用于实际稻茬地的田间作业。金亦富等^[11]设计了一种前后轴均为正旋的水旱两用双轴旋耕复式作业机,采用双轴分层切土原理,利用小回转半径旋耕刀,达到超大耕深的效果,耕深可达22 cm以上。现有双轴秸秆还田机械主要针对南方稻麦轮作区的小麦秸秆和玉米秸秆,针对北方寒地的水稻秸秆研究成果较少。

基于以上分析,本文针对东北地区特殊的气候环境及黑土地秸秆还田现状,拟设计一种适用于北方寒地的水稻秸秆双轴深埋还田机。采用前轴正旋后轴反旋的双轴作业模式。对整机进行设计,结合实际农艺要求及土壤运动过程确定前后两轴相对位置参数,利用EDEM离散元软件进行秸秆还田仿真虚拟试验确定最优工作参数,最终通过田间试验检验机具的作业性能。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构与主要参数

水稻秸秆双轴深埋还田机整机结构如图1所

示,主要由变速箱、机架、三点悬挂装置、挡草栅、后轴还田刀辊、侧边齿轮箱、前轴旋耕刀辊等部件组成,其前轴旋耕刀辊结构如图2a所示,主要由刀轴、刀座及IIT245型旋耕弯刀等部分组成,其后轴还田刀辊结构如图2b所示,主要由刀轴、刀盘及反旋深埋滑切还田刀等部分组成,整机可通过悬挂架上拉杆调节作业深度。

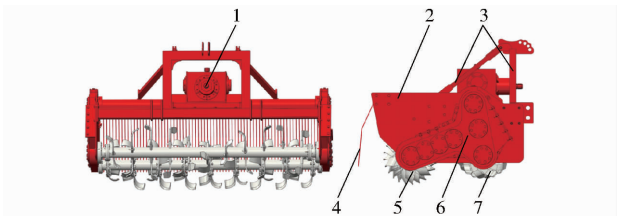


图1 水稻秸秆双轴深埋还田机结构图
Fig.1 Structural diagram of rice straw biaxial deep burial returning machine

1. 变速箱 2. 机架 3. 三点悬挂装置 4. 挡草栅 5. 后轴还田刀辊 6. 侧边齿轮箱 7. 前轴旋耕刀辊

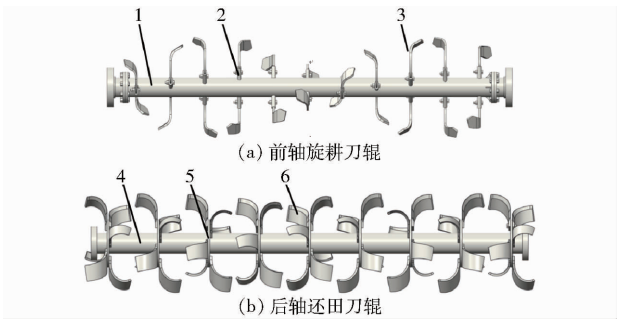


图2 刀辊结构图
Fig.2 Knife roller structure diagrams

1. 前刀轴 2. 刀座 3. IIT245型旋耕弯刀 4. 后刀轴 5. 刀盘 6. 反旋深埋滑切还田刀

为增加强度,还田机采用两侧齿轮箱同时传动的方式,还田机通过三点悬挂装置与拖拉机进行挂接,拖拉机动力输出轴经万向节联轴器与还田机变速箱上的动力输入轴连接,变速箱的动力输出轴通过还田机两侧的齿轮箱将动力传递给前轴旋耕刀辊及后轴还田刀辊。整机主要参数如表1所示。

表1 水稻秸秆双轴深埋还田机主要参数
Tab.1 Main parameters of double-shaft deep burial returning machine

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 416×1 240×1 353
配套动力/kW	≥66.2
前进速度/(km·h ⁻¹)	1.5
作业幅宽/mm	2 100
前轴刀辊转速/(r·min ⁻¹)	274.2
旋耕刀数量/把	22
后轴刀辊转速/(r·min ⁻¹)	219.4
还田刀数量/把	54

1.2 工作原理

工作时,前轴旋耕刀辊正旋作业,将地表上收获机粉碎后的秸秆及带根茬的直立秸秆向后抛送,并对土壤进行浅层切削,粉碎后轴还田刀辊前方的浅层土壤,以达到打破地表板结层、降低后轴还田刀辊旋耕阻力的目的,同时前轴正旋作业可解决后轴反旋作业产生的还田刀辊前方壅土问题。后轴还田刀辊反旋作业,对未耕作的深层土壤进行切削,在反旋刀的作用下,靠近刀柄部位的土块和秸秆完成翻转,实现秸秆和土壤混合;靠近刀头部位土壤和秸秆线速度较大,秸秆撞击在挡草栅后落入已旋耕地面,土块透过挡草栅覆盖在已下落的秸秆上,实现秸秆和土壤有效混合,工作原理如图 3 所示。

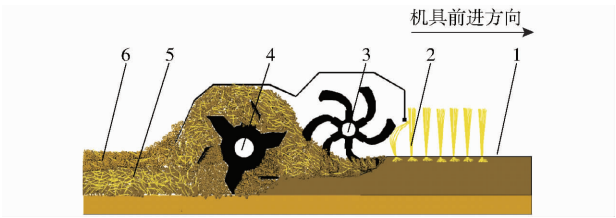


图 3 水稻秸秆双轴深埋还田机工作原理图
Fig.3 Working principle diagram of rice straw biaxial deep burial returning machine

1. 地表 2. 秸秆 3. 旋耕刀辊 4. 还田刀辊 5. 秸秆及大块土壤 6. 细碎土壤

2 关键部件设计

2.1 前轴旋耕刀辊设计

前轴刀辊设计为正旋作业,可解决机具前方壅土问题。传统旱田双轴旋耕机前轴采用 L 形灭茬刀辊^[12-13],结构排列紧凑且回转半径小,由于东北地区水稻秸秆量大、秸秆韧性强^[14]容易造成水稻秸秆缠绕于刀辊上,不利于水田作业。因此采用回转半径较大的旋耕刀辊进行前轴旋耕作业。根据国家标准 GB/T 5669—2017《旋耕机械刀和刀座》,选用 IIT245 型旋耕弯刀,刀座式安装,刀辊通过连接转盘安装在机架上,图 4 为前轴旋耕刀辊。

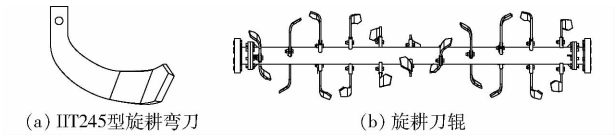


图 4 前轴旋耕刀辊示意图
Fig.4 Schematic of front axle rotary tiller roller

前轴旋耕刀辊主要是进行浅层切削,因此在进行刀具排列方式设计时应避免安装过多的旋耕刀产生缠草现象。本设计正旋刀辊采用双螺旋线排列,使刀辊受力均匀,减少壅土、缠草等现象^[15-16];同一平面内方向相反的旋耕刀相位角为 180°,同一螺旋

线相邻旋耕刀对称安装且相位角为 28°,共 22 把刀,安装方式如图 5 所示。

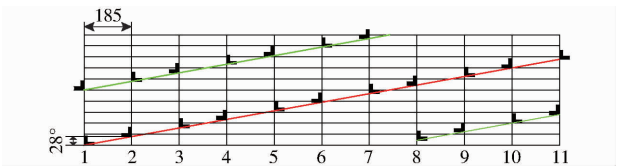


图 5 旋耕刀排列方式
Fig.5 Rotary blade arrangement

2.2 后轴反旋还田刀辊设计

后轴刀辊为反旋作业,还田刀采用团队前期研究设计的反旋深埋滑切还田刀^[17],如图 6 所示。还田刀根据阿基米德螺旋线及圆弧曲线设计。在工作时侧切刃先入土,正切刃后入土,增加了还田刀的滑切能力,降低了作业时的功耗。

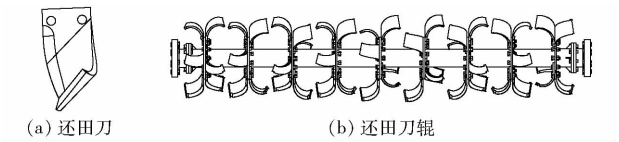


图 6 后轴还田刀辊示意图
Fig.6 Schematics of rear axle returning to field knife roller

根据机具实际尺寸及还田刀耕宽设计刀盘数为 9,每个刀盘间距为 233 mm,还田刀以螺旋线式安装在刀辊的刀盘上,安装方式如图 7 所示。

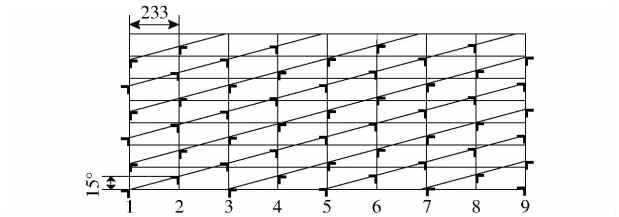


图 7 后轴还田刀排列方式
Fig.7 Arrangement of rear axle returning to field knife roller

2.3 工作过程分析

通过研究双轴作用下土壤颗粒的运动过程,可以分析双轴还田机的实际工作状态,确定对工作过程产生影响的因素,进而为后续设计提供理论依据。

实际作业情况下前轴进行浅层切削,设计旋耕刀耕深为 H_1 ,根据研究分析可知旋耕刀工作时底层土壤被抛出的水平距离最小^[18],因此对耕深为 $(H_1 - 10)$ mm 处的点 A 土壤颗粒进行运动轨迹分析。

机具前轴为旋耕刀正旋作业,旋耕刀端点的运动为机具前进运动与旋耕刀自身转动的合运动。以旋耕刀轴中心为原点 O ,以机具前进方向为 x 轴、垂直地面方向为 y 轴建立坐标系 xOy ;同时以点 A 为原点,旋耕刀在点 A 处线速度的反方向为 x' 轴,指向圆心方向为 y' 轴,建立坐标系 $x'Ay'$,此时点 A 处的运动分析如图 8 所示。

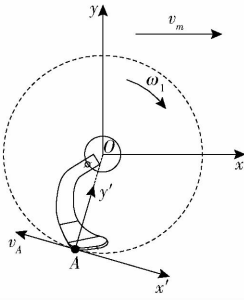


图8 旋耕刀在点A处运动分析示意图

Fig. 8 Schematic of motion analysis of rotary tiller at point A

确定旋耕刀在点A处的速度为

$$v_A = \sqrt{v_m^2 + R_1^2 \omega_1^2 - 2v_m R_1 \omega_1 \sin(\omega_1 t)} \quad (1)$$

式中 v_A ——旋耕刀在点A的速度, m/s

v_m ——机具前进速度, m/s

ω_1 ——旋耕刀角速度, rad/s

t ——旋耕刀所转时间, s

R_1 ——旋耕刀端点转动半径, mm

土壤颗粒与旋耕刀的相互作用满足高速切削碰撞模型^[19], 模型中碰撞后土壤相对速度的法向分量、切向分量和撞击前比例关系分别为

$$v_{2n}/v_{1n} = k \quad (2)$$

$$v_{2r}/v_{1r} = 1 - f \quad (3)$$

式中 v_{1n} ——旋耕刀法向分速度, m/s

v_{2n} ——碰撞后土壤颗粒法向分速度, m/s

v_{1r} ——旋耕刀切向分速度, m/s

v_{2r} ——碰撞后土壤颗粒切向分速度, m/s

k ——土壤碰撞恢复系数

f ——土壤瞬时摩擦因数

土壤碰撞恢复系数及土壤瞬时摩擦因数是建立模型的关键, 参照文献[20-21]选取土壤碰撞恢复系数为0.4、土壤瞬时摩擦因数为0.5。

碰撞后土壤颗粒在点A处的速度为

$$v'_A = \sqrt{(v_{1r} - v_{2r})^2 + (v_{1n} + v_{2n})^2} = v_A \sqrt{[(1+k)\sin\alpha]^2 + (f\cos\alpha)^2} \quad (4)$$

式中 v'_A ——碰撞后土壤颗粒速度, m/s

α ——土壤颗粒绝对速度方向与动坐标系 x' 轴夹角, rad

土壤颗粒在旋耕刀作用下向后抛送, 土壤颗粒初始点位置坐标为 $A(x_0, y_0)$, 根据文献[22]研究的旋耕正转抛土模型得出旋耕刀正转抛土轨迹为抛物线, 抛物线轨迹为

$$y = (x - x_0) \tan(\varphi - \alpha + \alpha') - \frac{g(x - x_0)^2}{2[v'_A \cos(\varphi - \alpha + \alpha')]^2} + y_0 \quad (5)$$

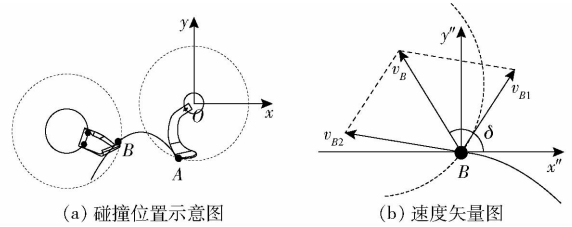
$$\text{其中} \quad \alpha' = \arctan\left(\frac{1+k}{f}\tan\alpha\right) \quad (6)$$

式中 g ——重力加速度, m/s²

φ —— v_A 与 x 轴夹角, (°)

α' ——土壤颗粒在动坐标系中绝对运动速度方向角

分析前后两轴之间颗粒运动时, 由于时间间隔较短, 此处可假设两轴保持相对位置不变。后轴为专为北方寒地水稻作业设计的反旋还田刀, 工作时旋耕刀端点运动轨迹理论为圆周运动, 土壤颗粒与还田刀在点B处接触, 由高速切削碰撞模型^[19]可知此时土壤颗粒沿还田刀正切面被加速抛掷, 速度为还田刀在点B处切速度 v_{B1} 与抛物线在点B处切速度 v_{B2} 矢量和。以点B为原点, 以机具前进方向为 x'' 轴、垂直地面方向为 y'' 轴建立坐标系 $x''By''$, 设碰撞处点B坐标为 (x_B, y_B) , 在点B还田刀与土壤颗粒接触位置如图9a所示, 土壤颗粒在点B处速度矢量图如图9b所示。



(a) 碰撞位置示意图

(b) 速度矢量图

图9 土壤颗粒在点B处运动分析示意图

Fig. 9 Schematics of movement analysis of soil particles at point B

分析可求得在点B处还田刀切速度 v_{B1} 与抛物线切速度 v_{B2} , 即

$$v_{B1} = \omega_2 R_2 \quad (7)$$

$$v_{B2} = \tan(\varphi - \alpha + \alpha') - \frac{g(x_B - x_0)}{[v'_A \cos(\varphi - \alpha + \alpha')]^2} \quad (8)$$

式中 R_2 ——还田刀端点转动半径, mm

ω_2 ——还田刀角速度, rad/s

土壤颗粒在点B最终抛出速度为 v_B , 与水平方向夹角为 δ , 即

$$v_B = v_{B1} + v_{B2} \quad (9)$$

$$\delta = \arctan\left|\frac{L_1 + x_B}{L_2 + y_B}\right| + \arccos\frac{v_B^2 + v_{B1}^2 - v_{B2}^2}{2v_B v_{B1}} \quad (10)$$

式中 L_1 ——两刀轴中心水平距离, mm

L_2 ——两刀轴中心竖直距离, mm

由式(9)、(10)可知, 实际作业中最终抛出速度与水平方向夹角 δ 应大于 90° , 才能满足土壤向机具斜后方抛出最终打击罩壳落于地面的条件。由分析可知夹角 δ 与前轴转速、后轴转速、两轴水平距离、两轴竖直距离有关。随着前轴转速的增加, 点B处 v_{B2} 逐渐增大, δ 逐渐变大; 随着后轴转速增加, 点

B 处 v_{B1} 逐渐增大, δ 逐渐变小; 随着水平距离 L_1 的增加, δ 逐渐变大; 随着竖直距离 L_2 的增加, δ 逐渐变大。上述工作过程分析可为后期机具设计提供理论依据。

2.4 两轴相对位置确定

双轴还田机设计时, 两轴相对位置关系是影响机具作业效果的重要因素, 两轴相对位置关系如图 10 所示。

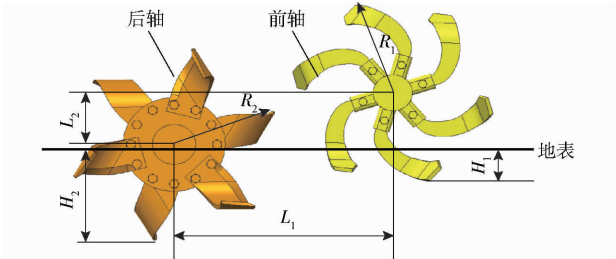


图 10 两轴相对位置关系示意图

Fig. 10 Schematic of relative position relationship between two tool axes

两轴之间的水平距离 L_1 是影响还田作业的重要参数, 根据式 (10) 可知若 L_1 设计过大会使整机尺寸过大, 工作效率低且两轴之间产生壅土情况; L_1 设计过小会降低机具还田效果。查阅文献 [23 - 24] 设置前轴旋耕刀转速为 220 ~ 280 r/min, 结合式 (5) 确定的机具作业过程中前轴抛土轨迹在转速 220 ~ 280 r/min 范围下土壤水平位移及前后刀轴旋转半径, 设计双轴水平距离 $L_1 = 650$ mm。

前后轴竖直距离 L_2 计算式为

$$L_2 = R_1 - R_2 - H_1 + H_2 \tag{11}$$

式中 H_2 ——后轴还田刀耕深, mm

前轴旋耕刀辊主要是将秸秆根茬破碎, 并对地表进行浅层切削, 在减少后轴还田刀辊工作阻力的同时将秸秆向后抛送, 结合《农业机械设计手册》中对根茬破碎作业深度 80 ~ 100 mm 的作业要求, 设定还田作业时前轴旋耕刀辊耕深为 100 mm; 现有单轴机具 [5 - 8] 的研究结果表明, 当耕深大于 150 mm 时, 可将水稻根系和地表覆盖均匀的秸秆进行掩埋, 当耕深设置为 180 ~ 200 mm 时, 可进一步提高秸秆还田率 (秸秆掩埋入土率), 减轻春季泡田后秸秆漂浮的问题, 因此, 设定后轴还田刀辊耕深为 180 ~ 200 mm。代入式 (11) 中, 求得 L_2 为 80 ~ 100 mm, 结合前期对作业过程所分析的结果, 取 $L_2 = 100$ mm。

3 仿真分析

为检验水稻秸秆双轴深埋还田机的作业性能, 采用离散元分析软件 EDEM 进行虚拟仿真试验。通过建立仿真土壤模型, 并与正交试验设计结合进

行仿真, 分析水稻秸秆双轴深埋还田机作业过程及机具前进速度、前轴转速、后轴转速 3 个试验因素对秸秆还田率、机具功耗 2 个试验指标的影响, 进而优化整机作业性能, 为后续田间试验奠定基础。

3.1 离散元模型建立

3.1.1 土壤模型建立

本文所设计机具的作业条件为东北地区黑土地, 土壤类型为黑土, 土壤含水率及表面粘附力较大, 所以在模拟土壤时选用 Hertz - mindlin with bonding 接触模型, 此模型可较好表达粘性土壤的破碎过程 [25 - 26]。为适应机具大小, 设置长 × 宽 × 高为 4 000 mm × 2 500 mm × 300 mm 的土槽。为保证试验准确性, 将土壤分为两层 [27], 分别是 0 ~ 150 mm 耕作层、150 ~ 300 mm 底层。本研究采用试验测定、文献参考等方法确定离散元仿真参数, 相关仿真参数选取参照文献 [28 - 29], 设定土壤颗粒参数生成土槽, 具体仿真参数见表 2。

表 2 土壤模型参数

Tab. 2 Soil model parameters

参数		数值
耕作层土壤	泊松比	0.38
	密度/(kg·m ⁻³)	1 280
	剪切模量/Pa	6 × 10 ⁷
	粘结半径/mm	5.51
底层土壤	泊松比	0.3
	密度/(kg·m ⁻³)	1 500
	剪切模量/Pa	1 × 10 ⁸
	粘结半径/mm	5.56
土壤与土壤	恢复系数	0.60
	静摩擦因数	0.50
	动摩擦因数	0.40
	恢复系数	0.28
土壤与耕作部件	静摩擦因数	0.50
	动摩擦因数	0.04
颗粒接触模型	耕作层土壤	粘结刚度/(N·m ⁻³)
		5 × 10 ⁷
	临界粘结应力/Pa	3 × 10 ⁵
底层土壤	粘结刚度/(N·m ⁻³)	5 × 10 ⁷
	临界粘结应力/Pa	5 × 10 ⁵

3.1.2 秸秆模型建立

通过颗粒堆积的方式建立水稻秸秆模型 [30], 本研究采用试验测定、文献参考等方法确定离散元仿真参数, 相关仿真参数选取参照文献 [17], 主要参数如表 3 所示。

以 18 个直径为 5 mm 的球形颗粒依次连接而成, 每个颗粒之间球心距为 3 mm, 组成长度为 56 mm 的水稻秸秆模型。

3.1.3 整机模型

应用 Creo2.0 软件绘制水稻秸秆双轴深埋还田

表 3 秸秆模型参数
Tab.3 Straw model parameters

参数		数值
秸秆	泊松比	0.40
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	235
	剪切模量/Pa	1×10^6
土壤与秸秆	恢复系数	0.60
	静摩擦因数	0.55
	动摩擦因数	0.20
秸秆与耕作部件	恢复系数	0.30
	静摩擦因数	0.30
	动摩擦因数	0.01

机几何模型,将模型以 .stl 格式导入 EDEM 中,触土部件还田刀材料为 65Mn,参考文献[21]设置材料泊松比为 0.35,剪切模量为 7.8×10^{10} Pa,密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$ 。

经过实际测量得到收获机收获后地表秸秆覆盖量为 $468\sim 578\text{ g/m}^2$,在仿真模型中生成与测量结果保持一致的秸秆量均匀铺放在土槽上,并将还田机仿真模型放置在土槽位置上,整体仿真模型如图 11 所示。

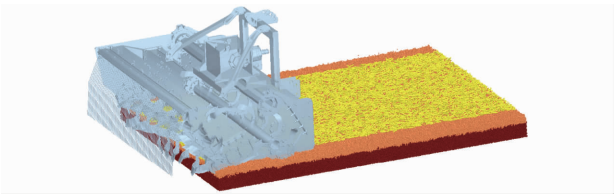


图 11 整体仿真模型
Fig.11 Overall simulation model

3.1.4 试验过程

根据前期理论分析,虚拟仿真开始前设定前轴耕深为 100 mm,后轴耕深为 200 mm,设置仿真固定时间步长为 $6.573\,2\times 10^{-5}\text{ s}$,网格单元尺寸为最小颗粒半径的 3 倍,仿真时间共计 10 s,每 0.01 s 保存一次数据。仿真计算参数设置完成后,开始仿真。

3.2 试验设计与评价指标

3.2.1 试验设计

在进行多因素试验过程中,由于仿真次数较多,为简化还田试验,截取还田机耕宽为 500 mm 的中心部分,放置于土槽中。以秸秆还田率及功耗作为评价指标进行多因素试验。机具前进速度、前轴转速、后轴转速是影响机具作业效果的重要因素,因此本文采用三因素三水平 Box - Behnken 响应面设计原理,选取前进速度、前轴转速、后轴转速为试验因素,秸秆还田率和功耗为试验指标。依据 2.4 节确定前轴转速为 220 ~ 280 r/min;机具反旋作业时,工作阻力较大,如果拖拉机前进速度过快会导致拖拉机熄火^[31]。因此,当反旋作业时,根据土壤状况,拖

拉机常采用低速 1 挡、2 挡或 3 挡作业,故确定机具前进速度为 1.5 ~ 3.0 km/h;已有研究^[17]表明反旋机具刀辊转速对秸秆还田率及功耗影响变化较大,刀辊转速过高时,机具功耗增大,刀辊转速过低时,还田率降低,因此,设计后轴转速为 190 ~ 250 r/min,试验因素编码如表 4 所示。

表 4 试验因素编码
Tab.4 Coding of test factors

编码	因素		
	前进速度 x_1 /	前轴转速 x_2 /	后轴转速 x_3 /
	($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
-1	1.50	220	190
0	2.25	250	220
1	3.00	280	250

3.2.2 评价指标

秸秆还田率及功耗是评价机具作业性能的重要指标^[32],测量方法如下:

(1) 秸秆还田率

在还田机工作区域内记录未耕作地表内全部秸秆数量 N_1 ,还田机工作结束记录已耕作区域地表秸秆数量 N_2 ,如图 12 所示。

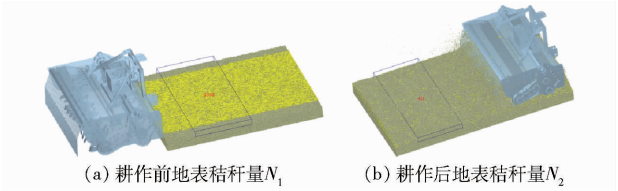


图 12 秸秆还田率测定
Fig.12 Determination of straw returning rate

还田率 ε_0 计算式为

$$\varepsilon_0 = \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right) \times 100\%$$
 (12)

(2) 功耗

仿真过程中待机具平稳运转后选取一定时间段,分别提取两刀轴扭矩,如图 13 所示。将数据取平均值即为各刀轴平均扭矩。

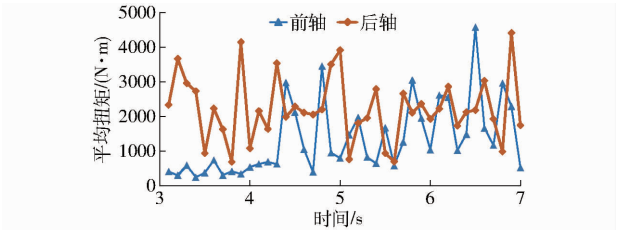


图 13 刀轴扭矩变化曲线
Fig.13 Tool shaft torque curves

将两轴功耗相加即为双轴还田机仿真过程中的平均功耗,功耗计算式为

$$P_h = \frac{\bar{T}_n}{9\,550}$$
 (13)

式中 P_h ——平均功耗, kW
 $\overline{T}$ ——平均扭矩, N·m
 n ——刀辊转速, r/min

3.3 仿真试验结果与分析

3.3.1 试验结果

共实施 17 组响应面分析试验, 结果见表 5, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 5 响应面分析结果

Tab. 5 Results of response surface analysis

试验号	因素			秸秆还田率	功耗
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	Y_2/kW
1	-1	-1	0	73.2	20.21
2	1	-1	0	66.5	31.91
3	-1	1	0	90.0	22.18
4	1	1	0	71.2	33.90
5	-1	0	-1	81.3	21.16
6	1	0	-1	65.2	35.00
7	-1	0	1	84.7	22.12
8	1	0	1	71.4	33.34
9	0	-1	-1	67.2	25.99
10	0	1	-1	80.6	28.67
11	0	-1	1	78.1	30.27
12	0	1	1	84.5	29.08
13	0	0	0	79.8	27.54
14	0	0	0	78.9	28.00
15	0	0	0	79.6	29.00
16	0	0	0	80.0	27.92
17	0	0	0	80.6	28.32

借助 Design-Expert 8.0.6 软件对秸秆还田率和还田机功耗进行回归模型的方差分析, 分析结果如表 6 所示。分别得出秸秆还田率、功耗回归方程为

$$Y_1 = 79.78 - 6.86X_1 + 5.16X_2 + 3.05X_3 - 3.03X_1X_2 + 0.70X_1X_3 - 1.75X_2X_3 - 3.25X_1^2 - 1.30X_2^2 - 0.88X_3^2 \quad (14)$$

$$Y_2 = 27.92 + 6.06X_1 + 0.68X_2 + 0.50X_3 \quad (15)$$

由表 6 可知, 秸秆还田率及功耗的二次回归模型 $P < 0.000\ 1$, 表明回归模型极显著; 失拟值 $P > 0.05$, 失拟不显著, 说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合, 能正确反映秸秆还田率及功耗与前进速度、前轴转速、后轴转速之间的关系。对目标函数 Y_1 , 因素 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_1^2 影响极显著, X_2X_3 、 X_2^2 影响显著, 其余各项均不显著; 对目标函数 Y_2 , 因素 X_1 影响极显著, 其余各项均不显著。根据模型各因素回归系数的大小确定各因素对秸秆还田率及功耗的显著性顺序, 从大到小依次均为前进速度、前轴转速、后轴转速。

表 6 回归方程方差分析

Tab. 6 Variance analysis of regression equation

试验指标	变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
秸秆还田率	模型	774.32	9	86.04	83.99	<0.000 1 **
	X_1	376.75	1	376.75	367.79	<0.000 1 **
	X_2	213.21	1	213.21	208.14	<0.000 1 **
	X_3	74.42	1	74.42	72.65	<0.000 1 **
	X_1X_2	36.60	1	36.60	35.73	0.000 6 **
	X_1X_3	1.96	1	1.96	1.91	0.209 1
	X_2X_3	12.25	1	12.25	11.96	0.010 6 *
	X_1^2	44.54	1	44.54	43.48	0.000 3 **
	X_2^2	7.14	1	7.14	6.97	0.033 4 *
	X_3^2	3.24	1	3.24	3.17	0.118 5
	残差	7.17	7	1.02		
	失拟	5.64	3	1.88	4.92	0.078 8
	误差	1.53	4	0.38		
	总和	781.49	16			
功耗	模型	299.45	3	99.82	80.66	<0.000 1 **
	X_1	293.73	1	293.73	237.37	<0.000 1 **
	X_2	3.72	1	3.72	3.01	0.106 6
	X_3	2.00	1	2.00	1.62	0.225 9
	残差	16.09	13	1.24		
	失拟	14.89	9	1.65	5.52	0.057 6
	误差	1.20	4	0.30		
	总和	315.53	16			

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

3.3.2 响应曲面法分析

根据建立的回归模型获得各因素交互效应响应曲面如图 14 所示。由图 14a、14b 可知, 当前轴转速及后轴转速固定在某一水平时, 前进速度由 1.5 km/h 增至 3.0 km/h 时, 秸秆还田率呈逐步下降趋势。当前进速度固定在某一水平时, 秸秆还田率随着前轴转速及后轴转速的增加呈逐渐升高的趋势。可知在前进速度 1.5 km/h、前轴转速 280 r/min 及前进速度 1.5 km/h、后轴转速 250 r/min 时秸秆还田率取得最大值。

由图 14c 可知, 当后轴转速固定在某水平时, 前轴转速由 220 r/min 增至 280 r/min 时, 秸秆还田率呈逐步上升的趋势。根据对仿真过程的观察, 出现该现象的主要原因是在双轴还田机工作工程中, 前轴主要起到向后抛送秸秆及浅层土壤的作用, 后轴切削的主要是深层土壤。后轴反旋作业会有土壤抛送至前方, 当前轴转速小于后轴转速, 前轴秸秆抛送能力低, 这样后轴就会将大部分土壤抛送至前轴部位覆盖住秸秆, 造成秸秆在下土壤在上的形态, 后续反旋作业时秸秆很容易被抛撒在地表上, 因此造成还田率低。随着前轴转速的增加, 后轴抛送至前方

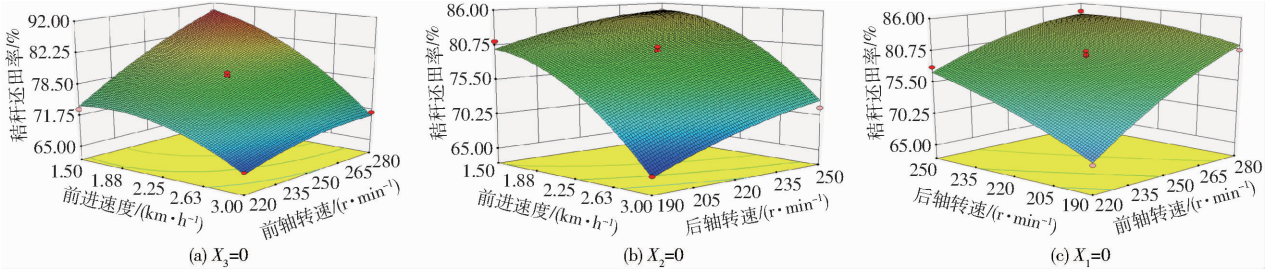


图 14 各因素对秸秆还田率影响的响应曲面

Fig. 14 Response surfaces of influence of various factors on straw return rate

的土壤逐渐减少,且前轴秸秆抛送能力逐渐增强,因此,还田率逐渐升高。当前轴转速固定在某一水平时,后轴转速由 190 r/min 增至 250 r/min 时,秸秆还田率呈逐步上升的趋势。出现该现象的主要原因是随着后轴转速的增加,后轴的抛送能力增强,因而还田率增加。

随着前进速度、前轴转速和后轴转速的增大,功耗均呈上升趋势,因素之间不存在交互作用。因此,在满足作业质量的前提下应尽量选择较小参数值。

3.3.3 参数优化与验证

为进一步提升水稻秸秆双轴深埋还田机的作业性能,利用 Design-Expert 8.0.6 的 Optimization 功能进行优化分析,约束各试验因素水平,以秸秆还田率取最大值、功耗取最小值为优化指标,即

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

得到最优参数组合为:前进速度 1.5 km/h、前轴转速 280 r/min、后轴转速 213.33 r/min,此时秸秆还田率为 90.10%、功耗为 22.43 kW。为了验证优化后参数准确性,利用 EDEM 进行 3 次重复试验,得到秸秆还田率及功耗平均值为 91.33%、23.12 kW。试验数据与模型优化值相对误差均小于 5%,说明优化结果可靠。

4 田间试验

4.1 试验设备与条件

为了检验水稻秸秆双轴深埋还田机实际作业性能,对水稻秸秆双轴深埋还田机进行田间试验。根据仿真优化结果及实际加工需求确定最优工作参数为:前进速度 1.5 km/h、前轴转速 274.2 r/min、后轴转速 219.4 r/min,研制出水稻秸秆双轴深埋还田机样机。

2022 年 5 月在东北农业大学农学院水稻试验田进行水稻秸秆还田作业,试验土壤类型为黑土,土

壤含水率为 15% ~ 20%,在距地表 150 ~ 200 mm 处土壤坚实度为 720 ~ 1 100 kPa,秸秆留茬高度为 15 ~ 20 cm,水稻秸秆覆盖量为 468 ~ 578 g/m²,配套机具为约翰迪尔 904 型拖拉机,机具前进速度为 1.5 km/h。

4.2 试验方法

以秸秆还田率、耕后地表平整度、碎土率、耕深作为机具作业质量的评价指标,其中碎土率、耕后地表平整度及耕深测量方法参照 NT/Y 499—2013《旋耕机作业标准》所述方法进行测量。

田间试验中还田率测量方法为:在未耕作地上测量单位面积(1 m × 1 m)内全部秸秆质量 M_1 ,耕作结束后测量已耕作地表上单位面积(1 m × 1 m)内秸秆质量 M_2 ,还田率 ε 计算式为

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{M_2}{M_1}\right) \times 100\% \quad (17)$$

4.3 试验结果与分析

试验机具及田间试验效果如图 15 所示。



图 15 试验机具及田间试验效果

Fig. 15 Test equipment and field test renderings

根据 NT/Y 499—2013《旋耕机作业标准》,随机选取 5 点作为测试点,取平均值作为最终试验结果,试验结果如表 7 所示。

表 7 田间试验结果
Tab.7 Field test results

参数	测量序号					平均值
	1	2	3	4	5	
还田率/%	90.9	88.7	88.9	91.2	89.1	89.76
平整度/cm	2.4	1.9	1.8	2.2	1.9	2.0
碎土率/%	98.8	98.5	97.9	98.1	97.7	98.2
耕深/cm	17.2	18.8	17.9	19.5	16.6	18.0

由表 7 可知,在实际田间作业时还田率为

88.7% ~ 91.2% ,平均值为 89.76% ;耕后地表平整度为 1.8 ~ 2.4 cm,平均值为 2.0 cm;碎土率为 97.7% ~ 98.8% ,平均值为 98.2% ;耕深为 16.6 ~ 19.5 cm,平均值为 18.0 cm。水稻秸秆双轴深埋还田机田间作业效果满足秸秆还田的要求,从田间作业效果上可以看出水稻秸秆双轴还田机在提升传统单轴机具作业质量的基础上未见明显机具前方壅土现象。

5 结论

(1)设计了一种水稻秸秆双轴深埋还田机,采用前轴正旋、后轴反旋的还田方式,对整机结构及关键部件进行设计。通过对双轴作用下土壤颗粒的运动过程进行分析,探究两轴相对位置关系对机具作业效果的影响规律,确定了前后刀轴水平距离

650 mm、竖直距离 100 mm。

(2)应用 EDEM 离散元软件进行仿真分析,采用 Box - Behnken 响应面优化法进行三因素三水平正交试验,研究了机具前进速度、前轴转速、后轴转速对秸秆还田率及功耗的影响,并根据仿真优化结果及实际加工需求确定最优工作参数为:前进速度 1.5 km/h、前轴转速 274.2 r/min、后轴转速 219.4 r/min。

(3)田间试验结果表明,在留茬高度为 15 ~ 20 cm、地表秸秆覆盖量为 468 ~ 578 g/m²、拖拉机前进作业速度为低速 1 挡(1.5 km/h)时,水稻秸秆双轴深埋还田机作业后,还田率为 88.7% ~ 91.2%、地面平整度为 1.8 ~ 2.4 cm、碎土率为 97.7% ~ 98.8%、耕深为 16.6 ~ 19.5 cm,各项指标均满足农艺要求,作业质量满足北方寒地稻田在秸秆还田作业要求。

参 考 文 献

[1] 王金武,唐汉,王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J]. 农业机械学报,2017,48(5):1-21.
WANG Jinwu,TANG Han,WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(5):1-21. (in Chinese)

[2] 韩鲁佳,闫巧娟,刘向阳,等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报,2002,18(3):87-91.
HAN Lujia,YAN Qiaojuan,LIU Xiangyang,et al. Straw resources and their utilization in China[J]. Transactions of the CSAE,2002,18(3):87-91. (in Chinese)

[3] CHEN Jin,ZHENG Mengjing,PANG Dangwei,et al. Straw return and appropriate tillage method improve grain yield and nitrogen efficiency of winter wheat[J]. Journal of Integrative Agriculture,2017,16(8):1708-1719.

[4] WANG Yajing,BI Yuyun,GAO Chunyu. The assessment and utilization of straw resources in China[J]. Agricultural Sciences in China,2010,9(12):1807-1815.

[5] 周勇,余水生,夏俊芳. 水田高茬秸秆还田耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(8):46-49,77.
ZHOU Yong,YU Shuisheng,XIA Junfang. Design and experiment of cultivator for high straw returning in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(8):46-49,77. (in Chinese)

[6] 王金峰,陈博闻,姜岩,等. 水稻秸秆全量深埋还田机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(1):84-93.
WANG Jinfeng,CHEN Bowen,JIANG Yan,et al. Design and experiment on machine for rice straw full quantity deep buried into field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(1):84-93. (in Chinese)

[7] 王金武,王奇,唐汉,等. 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(9):112-117.
WANG Jinwu,WANG Qi,TANG Han,et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):112-117. (in Chinese)

[8] 王金武,尹大庆,韩永俊,等. 水稻秸秆整株还田机的设计与试验[J]. 农业机械学报,2007,38(10):54-56.
WANG Jinwu,YIN Daqing,HAN Yongjun,et al. Design and experiment of whole rice straw returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(10):54-56. (in Chinese)

[9] 李永磊,宋建农,王继承,等. SGTN-180 型旋耕埋草施肥联合作业机的设计与试验[J]. 中国农业大学学报,2011,16(2):143-147.
LI Yonglei,SONG Jiannong,WANG Jicheng,et al. Design and experiment of a SGTN-180 type rotary tillage-straw returning-fertilization combined machine[J]. Journal of China Agricultural University,2011,16(2):143-147. (in Chinese)

[10] 胡建平,赵军,潘浩然,等. 基于离散元的双轴旋耕机功耗预测模型[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):9-16.
HU Jianping,ZHAO Jun,PAN Haoran,et al. Prediction model of double axis rotary power consumption based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.1):9-16. (in Chinese)

[11] 金亦富,秦浩天,张瑞宏,等. 水旱两用双轴旋耕复式作业机的设计与试验[J]. 中国农机化学报,2014,35(6):13-16.
JIN Yifu,QIN Haotian,ZHANG Ruihong,et al. Design and test of biaxial rotary duplex operation machine for paddy field and dry-land[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2014,35(6):13-16. (in Chinese)

[12] 李自宣,徐可可,严诗友,等. 双轴式旋耕灭茬机灭茬刀辊结构设计与试验[J]. 农机化研究,2020,42(4):117-124,131.
LI Zixuan,XU Keke,YAN Shiyu,et al. Structural design and test of stubble cutter roller for two-axis rotary stubble mitigation machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(4):117-124,131. (in Chinese)

[13] 张喜瑞,王自强,李粤,等. 滑切防缠式香蕉秸秆还田机设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(3):26-34.
ZHANG Xirui,WANG Ziqiang,LI Yue,et al. Design and experiment of sliding-cutting and anti-twining returning device for banana straw[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(3):26-34. (in Chinese)

[14] 孙妮娜,王晓燕,李洪文,等. 东北稻区不同秸秆还田模式机具作业效果研究[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):68-74,154.
SUN Nina,WANG Xiaoyan,LI Hongwen,et al. Performance of straw returning equipment under different mechanized straw

- returning pattern in northeast rice area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 68-74, 154. (in Chinese)
- [15] 陈桂斌, 卢彩云, 何进, 等. 秸秆条带拾捡粉碎深埋装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 16-27. CHEN Guibin, LU Caiyun, HE Jin, et al. Design and experiment of straw pickup-crushed and deep buried device under striptillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 16-27. (in Chinese)
- [16] 章志强, 何进, 李洪文, 等. 可调节式秸秆粉碎抛撒还田机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 76-87. ZHANG Zhiqiang, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on straw chopper cum spreader with adjustable spreading device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 76-87. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 方会敏, 姬长英, FARMAN Ali Chandio, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22-28. FANG Huimin, JI Changying, FARMAN Ali Chandio, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22-28. (in Chinese)
- [19] 孔令德, 王国林. 旋耕抛土模型研究综述[J]. 江苏理工大学学报, 1997, 18(5): 32-36. KONG Lingde, WANG Guolin. A survey of research on rotary soil-throwing model[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 1997, 18(5): 32-36. (in Chinese)
- [20] 牛琪, 王庆杰, 陈黎卿, 等. 秸秆后覆盖小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 52-59. NIU Qi, WANG Qingjie, CHEN Liqing, et al. Design and experiment on straw post-covering wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 52-59. (in Chinese)
- [21] 廖宜涛, 高丽萍, 廖庆喜, 等. 油菜精量联合直播机深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 65-75. LIAO Yitao, GAO Liping, LIAO Qingxi, et al. Design and test of side deep fertilizing device of combined precision rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 65-75. (in Chinese)
- [22] 姜萌, 刘彩玲, 魏丹, 等. 小麦宽苗带精量播种施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 53-62. JIANG Meng, LIU Cailing, WEI Dan, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 53-62. (in Chinese)
- [23] 肖茂华, 汪开鑫, 杨望, 等. 基于东方蜈蚣爪趾的仿生旋耕刀设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 55-63. XIAO Maohua, WANG Kaixin, YANG Wang, et al. Design and experiment of bionic rotary blade based on claw toe of *Gryllotalpa orientalis burmeister*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 55-63. (in Chinese)
- [24] 张春岭, 夏俊芳, 张居敏, 等. 六头螺旋秸秆还田耕整机刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 25-34. ZHANG Chunling, XIA Junfang, ZHANG Jumin, et al. Design and experiment of knife roller for six-head spiral straw returning cultivator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 25-34. (in Chinese)
- [25] 王学振, 岳斌, 高喜杰, 等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 124-136. WANG Xuezhen, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 124-136. (in Chinese)
- [26] 苑进, 李金光, 邹亮亮, 等. 基于离散元的菠菜收获机根切铲优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 85-98. YUAN Jin, LI Jinguang, ZOU Liangliang, et al. Optimal design of spinach root-cutting shovel based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 85-98. (in Chinese)
- [27] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刀深松铲研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 62-72. ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62-72. (in Chinese)
- [28] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 72-80. (in Chinese)
- [29] 丁启朔, 任骏, BELAL Eisa Adam, 等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 38-48. DING Qishuo, REN Jun, BELAL Eisa Adam, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 38-48. (in Chinese)
- [30] 方会敏, 姬长英, AHMED Ali Tagar, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60-67. FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60-67. (in Chinese)
- [31] 李增宏. 旋耕机的类型和构架的研究推广分析[J]. 农业技术与装备, 2007(12): 25-26. LI Zenghong. Research and popularization analysis of the type and structure of rotary tiller[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2007(12): 25-26. (in Chinese)
- [32] 管春松, 崔志超, 高庆生, 等. 双轴旋耕碎土试验台设计与分层耕作试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 28-37. GUAN Chunsong, CUI Zhichao, GAO Qingsheng, et al. Design of biaxial rotary tillage soil test bench and layered tillage test[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(10): 28-37. (in Chinese)