

稻油轮作区铲锹式油菜直播种床整备机设计与试验

廖庆喜^{1,2} 林建新¹ 张青松^{1,2} 谢昊明¹ 杜文斌¹ 吴崇¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对长江中下游稻油轮作区土壤黏重板结、秸秆量大等问题,油菜直播种床整备采用传统旋耕方式常导致耕层浅、埋茬效果不足和平整度较低的实际问题,本文结合油菜种植农艺要求,设计了主动铲锹切土、抛土,并集成被动式开畦沟、碎土、平整厢面装置,实现适宜油菜直播的土壤翻耕、碎土、秸秆埋覆、平整等功能的铲锹式种床整备机;根据铲锹入土角、耕深、切土节距等要求,建立了曲柄连杆机构运动学模型,基于 Matlab 软件分析得出曲柄连杆机构结构参数;根据铲尖运动轨迹、切土节距、沟底凸起高度等要求,确定了左右交错式铲锹和螺旋式的曲柄排列方式,开展了机组运行参数的匹配设计,得出了机组前进速度 v_m 为 0.4 ~ 0.5 m/s、曲柄转速 n 为 240 r/min;同时开展了土壤被铲锹抛出后运动过程分析,确定了罩壳安装参数;建立了基于离散元方法的耕作部件-土壤-秸秆相互作用仿真模型,应用 EDEM 与 ADAMS 软件耦合分析了机具的秸秆埋覆性能,仿真结果表明,平均秸秆埋覆率为 91.64%,可实现秸秆深埋还田。田间试验表明,在高茬水稻秸秆工况下,铲锹式种床整备机的平均作业耕深为 215.3 mm,与传统旋耕方式相比,平均耕深提高 99.2 mm;秸秆埋覆率为 89.43%,相比传统旋耕方式的埋覆率提升了 27.61 个百分点,且机组无缠绕和堵塞,通过性好,整机作业质量达到稻茬地油菜直播种床整备的要求。

关键词: 油菜直播; 种床整备; 铲锹式; 曲柄连杆机构; 运动学分析

中图分类号: S222.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)10-0026-10 OSID: 

Design and Experiment of Shovel Type Seedbed Preparation Machine
Suitable for Rapeseed Direct Seeding

LIAO Qingxi^{1,2} LIN Jianxin¹ ZHANG Qingsong^{1,2} XIE Haoming¹ DU Wenbin¹ WU Chong¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Based on the objective reality of the sticky soil and large amount of straw in the rice-oil rotation area of the mid-lower Yangtze River, the traditional rotary tillage method for rapeseed direct seeding often leads to practical problems such as shallow plough layer, low stubble burying rate and low flatness. Combined with the agronomic requirements for the preparation of rapeseed seedbeds, a shovel-type seedbed preparation machine suitable for rapeseed direct seeding that realized the functions of soil plowing, soil crushing, straw burial covering, and leveling was designed, which cut and threw soil through active shovel, and integrated passive trenching, soil crushing, and flat surface. According to the requirements of the shovel entry angle, tillage depth, soil cutting pitch, etc., a kinematic model of the crank connecting rod mechanism was established. Based on the Matlab software analysis, the structure parameters of the crank connecting rod mechanism were obtained. And according to the requirements of shovel tip movement trajectory, cutting pitch, ditch bottom protrusion height, etc., the left and right staggered structure of the shovel and the crank spiral arrangement were determined. And the matching design of the unit operating parameters was carried out, the speed (v_m) was 0.4 ~ 0.5 m/s, the crank rotation speed (n) was 240 r/min. The analysis of the movement process of the soil after being thrown by the shovel was carried out, the installation parameters of the enclosure were determined. A simulation model for the interaction of tillage components-soil-straw based on the discrete element method was established. The EDEM and ADAMS software were used to analyze the straw burial performance of the

收稿日期: 2021-11-21 修回日期: 2021-12-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000004)和国家自然科学基金项目(32001427)

作者简介: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究, E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

machine, and the simulation results showed that the average straw burial rate was 91.64%, which can realize the deep burying of straw and returning it to the field. Field experiments showed that under the condition of high stubble rice straw, the average working depth of the shovel-type seedbed preparation machine was 215.3 mm, which was 99.2 mm higher than that of the traditional rotary tillage method; the stubble burying rate was 89.43%, which was an increase of 27.61 percentage points compared with the traditional rotary tillage method. The operation effect of the whole machine met the requirements for the preparation of the rapeseed direct seeding bed in the rice stubble field.

Key words: rapeseed direct seeding; seedbed preparation; shovel-type; crank mechanism; kinematic analysis

0 引言

长江中下游地区作为我国冬油菜的主产区,主要采用稻-油水旱轮作的种植模式^[1]。2020 年全国水稻产量达 $2.118\ 6 \times 10^8$ t, 比 2019 年增产 1.1%^[2], 高产量的同时也使水稻收获后秸秆留存量大。面对高茬秸秆工况, 油菜直播种床整备作业时传统旋耕工序易出现刀辊缠绕、埋茬率低等问题^[3-7]。此外, 传统旋耕作业耕深浅, 周年的旋耕作业使耕作层变浅, 犁底层加厚, 导致土壤通气性差、油菜根系下扎困难^[8]。

针对传统旋耕方式在稻茬田开展油菜直播种床整备作业时存在的不足, 国内外相关学者也进行了研究。肖文芳等^[9]针对稻茬田秸秆量大导致机具易堵塞的问题, 设计了一种犁翻埋茬、旋耕碎土的油菜种床整理机, 可实现秸秆全量还田; 魏国梁等^[10]为解决旋耕作业耕深浅、秸秆埋覆率低的问题, 设计了一种通过先抬后扣作业方式实现土壤翻埋的扣袋装置, 并集成了犁旋组合式油菜直播机; 刘晓鹏等^[11]针对传统耕整作业耕层浅、功耗大的问题, 设计了驱动圆盘犁对置组合式耕整机, 作业效果满足油菜种床整理要求; 张文良等^[12]设计了一款可适用于稻茬地耕整作业的秸秆犁旋还田联合作业机, 作业效果良好。国内学者通过将旋耕装置与犁耕作业集成, 实现秸秆翻埋, 但整机纵向尺寸增大, 在长江中下游地区田间生产推广应用中有一定局限性。国外耕整地作业主要采用免耕, 作业机具以宽幅、被动式的大型联合耕整机为主^[11, 13-14], 不适用于长江中下游地区的耕整地作业。

本文针对长江中下游稻油轮作区油菜直播种床整备作业时传统旋耕方式导致耕层浅、埋茬效果不足和平整度较差的问题, 设计一种通过主动铲锹切土、抛土, 实现土壤翻耕、细碎、秸秆埋覆的铲锹式耕整地装置, 并集成设计被动式开畦沟、碎土、平整功能的适宜油菜直播的铲锹式种床整备机, 以期一次下地作业完成土壤翻耕、碎土平整、秸秆埋覆、开畦沟等功能。

1 总体结构与工作过程

1.1 总体结构组成

铲锹式种床整备机整体结构如图 1 所示, 主要由主机架、齿轮传动箱、铲锹式耕整地装置、罩壳、拦土耙、平土拖板、开畦沟装置、限深装置、中间犁、三点悬挂装置等组成。齿轮传动箱两侧各有 5 组曲柄连杆机构组成的铲锹式耕整地装置, 每组曲柄连杆机构的连杆末端左右交错安装有两把铲锹, 减少作业土垡尺寸, 便于后续碎土作业。罩壳、拦土耙、平土拖板依次安装在铲锹后方, 起碎土、埋茬、平整作用。开畦沟装置由铰式开畦沟前犁和开畦沟后犁组成, 对称布置在机具两侧, 完成开畦沟作业。该机主要技术参数如表 1 所示。

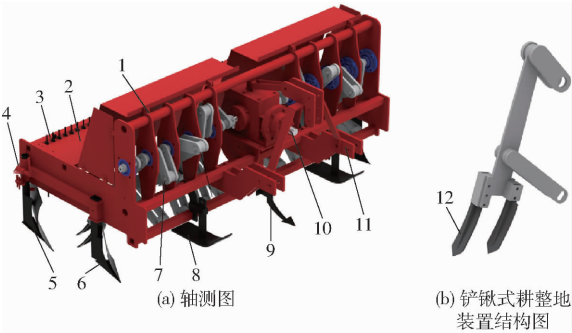


图 1 铲锹式种床整备机结构示意图
Fig. 1 Schematics of shovel type seedbed preparation machine

1. 机架 2. 罩壳 3. 拦土耙 4. 平土拖板 5、6. 开畦沟装置
7. 铲锹式耕整地装置 8. 限深装置 9. 中间犁 10. 中央齿轮箱
11. 三点悬挂装置 12. 铲锹

表 1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters	
参数	数值
外形尺寸/(mm × mm × mm)	1 470 × 2 300 × 1 110
配套动力/kW	≥60
作业速度/(m · s ⁻¹)	0.40 ~ 0.50
作业幅宽/mm	2 300
切土节距/mm	96 ~ 120
耕作深度/mm	200 ~ 240
开畦沟宽度/mm	200 ~ 240
开畦沟深度/mm	200 ~ 250

1.2 工作过程

铲锹式种床整备机由拖拉机 PTO 提供动力,通过十字万向节将动力传递到中央齿轮箱,带动两侧铲锹式耕整地装置运行。如图 2 所示,土堡与秸秆被铲锹作业后往后上方抛起,与罩壳碰撞细碎,在下落过程撞上拦土耙,尺寸小于拦土耙间隙的土堡直接通过,覆盖在已耕区表层;被拦土耙挡住的秸秆和尺寸大于拦土耙间隙的土堡一部分落至已耕区底层,另一部分后续被铲锹再次铲起抛向罩壳进一步碎土,直至土块尺寸小于拦土耙间隙,最后由平土拖板平整地表,形成秸秆深埋、土壤上细下粗的理想耕作环境。限深装置可以对耕作深度进行调节,中间犁的作用是消除中间的漏耕区域,开畦沟前犁和开畦沟后犁同步作业出排水畦沟,实现拖拉机一次下地即可完成油菜的种床准备工作。

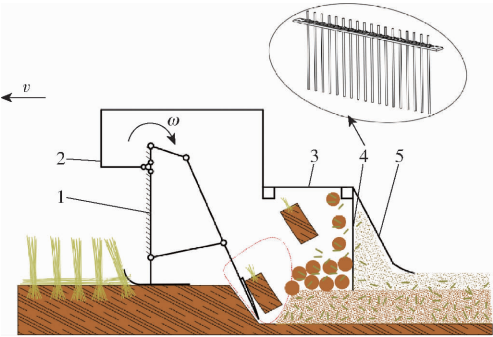


图2 铲锹式种床整备机工作原理图
Fig.2 Working principle diagram of shovel type seedbed preparation machine

1. 曲柄连杆机构 2. 机架 3. 罩壳 4. 拦土耙 5. 平土拖板

2 关键部件设计

2.1 铲锹式耕整地装置设计与轨迹分析

2.1.1 铲尖点运动轨迹

铲尖点相对机架相对运动轨迹大小和形状只取决于机构结构参数,不受前进速度和其他运动参数的影响。为确定铲尖点 E 相对运动轨迹,以机具前进相反方向作为 x 轴正方向,竖直向上方向作为 y 轴正方向,建立如图 3 所示的直角坐标系 xOy 。 $HIJKH$ 为铲尖点 E 在一个工作行程内的相对运行轨迹,其中: HI 为铲锹的入土过程、 IJ 为剪切土壤的过程、 JK 为抛土过程、 KH 为铲锹回程。

结合人工铲锹动作经验,入土过程段 HI 应为直线入土,考虑铲锹入土阻力及铲锹到达最大耕深后剪切土堡的阻力, HI 段切线与水平方向所夹锐角 λ 初步确定为 45° 与 70° 之间; IJ 段为剪切土壤的过程,同时连接入土段与抛土段,故要求此过渡段为光滑圆弧;被剪切的土堡自点 J 起跟随铲锹运动,至点 K 达到最大速度被铲锹抛出,为避免土堡被抛向未

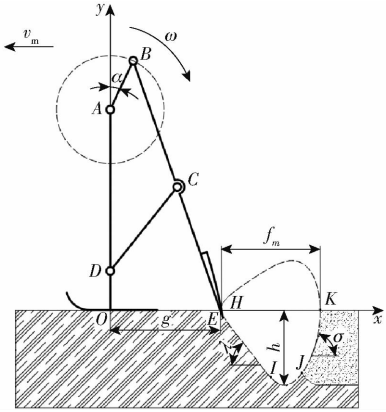


图3 铲尖点运动轨迹示意图

Fig.3 Schematic of trajectory of tip of shovel

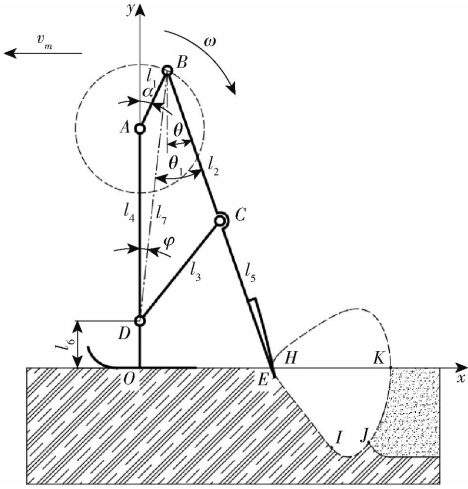
耕区导致重耕, JK 段切线与水平方向夹角 σ 取值应小于 90° 。

h 为铲锹耕作深度,其取值应不小于 200 mm ; f_m 为铲锹在一个工作行程的最大切土厚度,其取值应小于工作臂长度 l_{CE} 。 g 为铲锹入土点与机架的水平距离,经动力学分析表明, g 应在满足机构运动条件下选取较小值,较佳取值范围为 $250 \sim 450\text{ mm}$ 。

在已知铲尖点轨迹情况下,采用如图 3 所示的曲柄连杆机构实现所需的目标轨迹。

2.1.2 曲柄连杆机构设计

为确定曲柄连杆机构结构参数,建立运动学模型,如图 4 所示,其中原点 O 为初始时刻机架 AD 的延长线与地面的交点。其中: AB 为主动杆曲柄, BC 为连杆,连杆向下延伸形成带有铲锹的工作臂 CE , CD 为摇杆, AD 为机架,点 D 为摇杆与机架铰接点。



其中

$$\begin{cases} \theta = \theta_1 - \varphi = \arccos \frac{l_2^2 + l_7^2 - l_3^2}{2l_2l_7} - \varphi \\ l_7 = \sqrt{l_1^2 + l_4^2 + 2l_1l_4\cos\alpha} \\ \varphi = \arcsin \frac{l_1\sin\alpha}{l_7} \\ \alpha \in [0, 2\pi] \end{cases} \quad (2)$$

式中 l_1 ——主动杆曲柄 AB 长度, mm
 l_2 ——连杆 BC 长度, mm
 l_3 ——摇杆 CD 长度, mm
 l_4 ——机架 AD 长度, mm
 l_5 ——工作臂 CE 长度, mm
 l_6 ——铰接点 D 与地面的距离, mm
 l_7 —— BD 连线长度, mm
 θ ——连杆 BC 与竖直方向所夹锐角, ($^\circ$)
 θ_1 ——连杆 BC 与 BD 连线所夹锐角, ($^\circ$)
 φ —— BD 连线与机架 AD 所夹锐角, ($^\circ$)

点 E 速度方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_E = \dot{\alpha}l_1\cos\alpha + \dot{\theta}(l_2 + l_5)\cos\theta \\ \dot{y}_E = -\dot{\alpha}l_1\sin\alpha + \dot{\theta}(l_2 + l_5)\sin\theta \end{cases} \quad (3)$$

铲尖点相对运动轨迹各参数表达式为

$$\begin{cases} h = |\min(y_E)| \\ f_m = \max(x_E) - \min(x_E) \\ g = x_E|_{\alpha=0} \end{cases} \quad (4)$$

设铲尖点 E 在 $\alpha = \alpha_l$ 时到达点 I , 则 HI 段切线
与水平方向所夹锐角最大值 $\lambda_{\max}$ 和最小值 $\lambda_{\min}$ 为

$$\begin{cases} \lambda_{\max} = \arctan \left| \frac{\dot{y}}{\dot{x}} \right| \Big|_{\alpha=0} \\ \lambda_{\min} = \arctan \left| \frac{\dot{y}}{\dot{x}} \right| \Big|_{\alpha=\alpha_l} \end{cases} \quad (5)$$

设铲尖点 E 在 $\alpha = \alpha_k$ 时到达点 K , 则 JK 段切线
与水平方向所夹锐角最大值 $\sigma_{\max}$ 为

$$\sigma_{\max} = \arctan \left| \frac{\dot{y}}{\dot{x}} \right| \Big|_{\alpha=\alpha_k} \quad (6)$$

当主动杆曲柄转角 $\alpha = 180^\circ$, 曲柄与机架运动
学尺寸重合共线, 机构存在最小传动角 $\gamma_{\min}$, 本连杆
机构为相对高速大功率的情形, 为保证良好的传力
性能, 其值应大于 50° , 即

$$\gamma_{\min} = \arccos \frac{l_2^2 + l_3^2 - (l_4 - l_1)^2}{2l_2l_3} > 50^\circ \quad (7)$$

由曲柄存在条件得

$$\begin{cases} l_1 < \min(l_2, l_3, l_4) \\ l_1 + l_2 \leq l_3 + l_4 \\ l_1 + l_3 \leq l_2 + l_4 \\ l_1 + l_4 \leq l_2 + l_3 \end{cases} \quad (8)$$

涉及的连杆参数主要有: 曲柄长 l_1 、连杆长 l_2 、
工作臂长 l_5 、摇杆长 l_3 、机架长 l_4 以及铰接点 D 与地
面距离 l_6 。

基于所建立的运动学模型, 利用 Matlab 软件中的
GUI 模块对连杆机构进行迭代求解, 计算后可得到
满足作业要求的机构参数: 曲柄长 $l_1 = 166$ mm, 连
杆长 $l_2 = 414$ mm, 摇杆长 $l_3 = 331$ mm, 机架长 $l_4 =$
 497 mm, 工作臂长 $l_5 = 373$ mm, 铰接点 D 离地面高
度 $l_6 = 90$ mm, 其他各组合参数如表 2 所示, 均满足
设计目标。

表 2 连杆机构参数

Tab. 2 Optimized parameters of linkage mechanism	
参数	数值
入土角 $\lambda/(^\circ)$	49.8 ~ 63.9
抛土角 $\sigma/(^\circ)$	52.6 ~ 86.1
最小传动角 $\gamma_{\min}/(^\circ)$	51.3
水平距离 g/mm	334.5
最大切土厚度 $f_{\max}/\text{mm}$	293.5
铲耨耕作深度 h/mm	203.7

2.1.3 铲耨结构设计与分析

该机共有 10 组曲柄连杆机构, 单组机构耕幅为
 180 mm。在不改变单组曲柄连杆机构耕幅的前提
下, 减小铲耨单次铲起的土堡尺寸, 提高机具作业后
的碎土率, 采取每组机构的连杆末端安装两把左右
交错的铲耨, 如图 5 所示。考虑左右两把铲耨受力
对连杆产生的力矩平衡及单把铲耨的耕宽, 取铲耨
前后中心距 e_1 为 100 mm、左右中心距 e_2 为 90 mm。

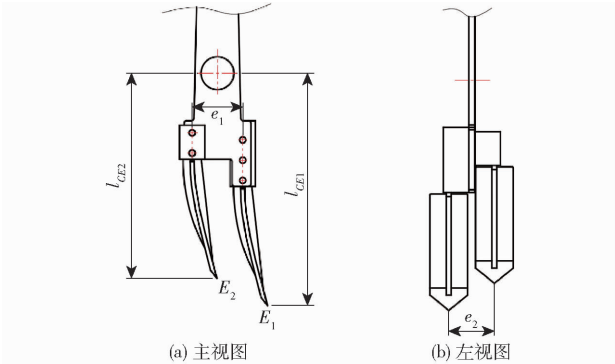


图 5 交错铲耨示意图

Fig. 5 Schematics of misplaced shovel

为减少机具作业过程中的漏耕、夹土现象, 以及
避免装配干涉的出现, 应保证 10 组连杆机构的曲柄
间存在相位差, 实现铲耨的交替入土, 且相继入土的
铲耨在轴向应保持一定距离。为此, 采用螺旋线的
排列方式对曲柄进行安装, 同一螺旋线上的同向相
邻曲柄升角为 72° , 排布示意如图 6 所示。

2.2 机组运行参数匹配

机组前进速度 v_m 和曲柄转速 n 决定了铲尖点

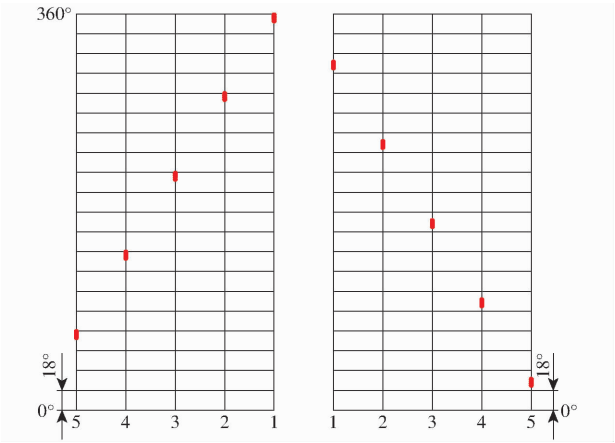


图6 曲柄排布示意图

Fig. 6 Diagram of crank arrangement

相对地面的绝对运动轨迹,如图7所示,铲尖点轨迹参数主要有切土节距 S 、最大切土厚度 f 及沟底凸起高度 h_c 。根据相关农艺要求对机组运行参数进行设计。

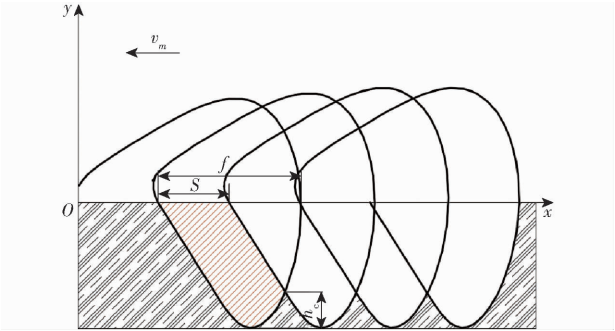


图7 铲尖点绝对运动轨迹及参数

Fig. 7 Absolute trajectory and parameters of tip of spade

切土节距 S 即铲锹在一个工作行程内实际所切的土堡厚度,计算式为

$$S=\frac{60v_m}{n}$$

(9)

最大切土厚度 f 为铲锹在一个工作行程内所能切下的最大土堡厚度; h_c 称为沟底凸起高度,此区域为没有耕到的生土。

切土节距 S 影响碎土质量和厢面平整度,为得到适合油菜播种作业的种床,对于中等黏度的稻田土,当土壤含水率为20%~30%时,切土节距 S 取100 mm左右较为合适^[15]。考虑机具作业后的碎土率以及避免产生漏耕现象,应满足 $S<f$ 。沟底凸起高度 h_c 应控制在农业技术要求允许的范围内,一般小于耕深的20%^[15],此处耕深为200~240 mm,即 h_c 应小于40 mm。

经计算确定机组前进速度 v_m 为0.4~0.5 m/s、曲柄转速 n 取240 r/min,对应的切土节距 S 和最大切土厚度 f 分别为100~125 mm、238~257 mm。此时 $S<f$,机组作业后碎土率高。对应的沟底凸起高

度 h_c 为36~61 mm,考虑铲锹与土壤的撕扯作用,一般凸起高度实际值只有理论值的1/3~1/2^[16],即沟底凸起高度 h_c 实际为18~31 mm,满足农业技术要求。

图8为铲尖点在一个工作行程内的绝对运动轨迹,此时铲尖点 E_1 、铲尖点 E_2 的绝对运动轨迹均为“类余摆线”,即从铲尖点开始入土到抛土结束,其绝对轨迹上任意一点的水平分速度均指向 x 轴正方向,满足向后抛土的条件。

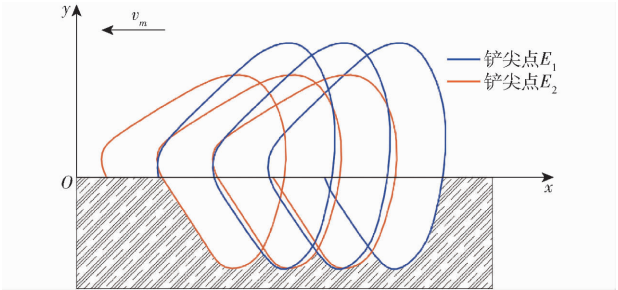


图8 铲尖点 E_1 、 E_2 绝对运动轨迹

Fig. 8 Absolute trajectory of blade tip points E_1 and E_2

2.3 罩壳参数设计

罩壳的主要作用是挡住被铲锹抛出的土堡,使其在撞击过程中进一步破碎。分析土堡被抛出后的运动情况,以确定罩壳安装参数,使土堡能与罩壳碰撞。

为方便理论分析与计算,假设土块为刚体,忽略空气阻力和土壤间的相互碰撞,土堡被抛出后可近似于斜抛运动。

2.3.1 铲锹抛土运动学模型建立

建立铲锹抛土运动学模型如图9所示, l 为罩壳 O_1O_2 的长度, β 为罩壳与水平方向所夹锐角,罩壳左端点 O_1 相对于机架 AD 与地面的位置参数分别为 l_x 和 l_y ,并设初始时刻 $t=0$ 时曲柄 AB 转角 $\alpha=0^\circ$ 。

曲柄角速度为 ω ,罩壳和曲柄连杆机构随机具

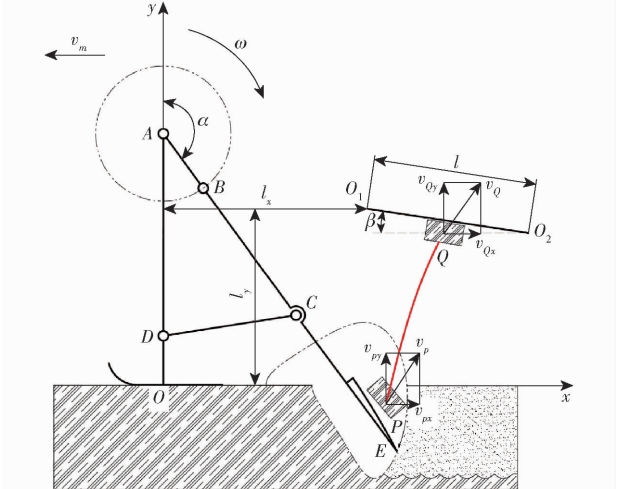


图9 铲锹抛土运动学模型

Fig. 9 Kinematics model of shovel throwing soil

以速度 v_m 沿 x 轴负方向运动, 罩壳左端点 O_1 坐标为

$$\begin{cases} x_{o1} = l_x - v_m t \\ y_{o1} = l_y \end{cases} \quad (10)$$

罩壳右端点 O_2 坐标为

$$\begin{cases} x_{o2} = l_x - v_m t + l \cos \beta \\ y_{o2} = l_y - l \sin \beta \end{cases} \quad (11)$$

将罩壳简化为直线 O_1O_2 , 其方程可表示为

$$y = l_y - (x - l_x + v_m t) \tan \beta \quad (12)$$

若被切削的土堡在跟随铲式运动的过程中在 t_1 时刻从点 P 被抛出, 如图 9 所示, 设点 P 在坐标系 xOy 中的坐标为 (x_p, y_p) , 土堡被抛出时具有 x 轴方向的初速度 v_{px} 和 y 轴方向的初速度 v_{py} , 当不计空气阻力时, 土堡在点 P 被抛出后的运动方程为

$$\begin{cases} x = x_p + v_{px}(t - t_1) \\ y = y_p + v_{py}(t - t_1) - \frac{1}{2}g(t - t_1)^2 \end{cases} \quad (13)$$

设被抛出的土堡与罩壳发生碰撞, 碰撞点 Q 在坐标系 xOy 中坐标为 (x_q, y_q) , 设土堡在点 P 被抛出后经过 t_2 到达罩壳上的碰撞点 Q , 则由式 (12)、(13) 可得

$$y_q = l_y - [x_p + (v_{px} + v_m)t_2 + v_m t_1 - l_x] \tan \beta \quad (14)$$

将式 (14) 代入式 (13) 可得

$$t_2 = \frac{-n - \sqrt{n^2 - 4mk}}{2m} \quad (15)$$

其中

$$\begin{cases} m = g \\ n = -2(v_{py} + v_{px} \tan \beta + v_m \tan \beta) \\ k = 2(l_y - y_p - x_p \tan \beta + l_x \tan \beta - v_m t_1 \tan \beta) \end{cases} \quad (16)$$

对于给定的罩壳参数 l_x 、 l_y 、 l 和 β , 若可求得铲式铲尖点 E 运行至土堡抛出点 P 的时间 t_1 、点 P 坐标值 (x_p, y_p) 及土堡被抛出时的初速度 v_{px} 、 v_{py} , 则可判断被抛出的土堡是否能与罩壳发生碰撞。若能碰撞, 则可求解出碰撞时间 t_2 , 进而通过式 (13) 可计算出罩壳上碰撞点 Q 的坐标值 (x_q, y_q) 。

土堡与罩壳碰撞时速度为

$$\begin{cases} v_{Qx} = v_{px} \\ v_{Qy} = v_{py} - gt_2 \end{cases} \quad (17)$$

2.3.2 罩壳参数确定

为确定罩壳参数, 需求解铲尖点运行至土堡抛出点 P 的时间 t_1 、点 P 坐标值 (x_p, y_p) 及土堡被抛出时的初速度 v_{px} 、 v_{py} , 此处应用多体动力学软件对铲尖点运动情况进行分析。在此以经由铲尖点 E_1 抛出的土堡为例进行分析。

在 Pro/E 软件中以机架 AD 与 y 轴重合、曲柄转角 $\alpha = 0^\circ$ 为初始位置建立曲柄连杆机构模型, 导入

ADAMS 软件的建模环境中, 对零部件合并简化, 添加初始驱动: 曲柄转速 $n = 240$ r/min、前进速度 $v_m = 0.45$ m/s。提取铲尖点 E_1 在运动时间 $0 \sim 0.5$ s 内速度变化数据点, 并在 Matlab 中拟合成光滑的速度变化曲线, 如图 10 所示。

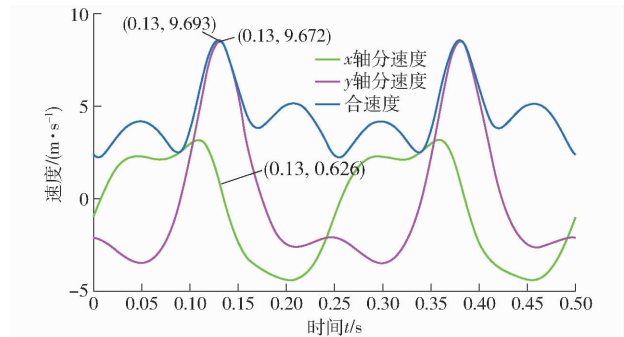


图 10 铲尖点 E_1 速度变化曲线

Fig. 10 Speed change curves of shovel tip point

铲式在铲尖点速度达到最大值时将土堡抛出, 对求解的速度进行分析可得由铲尖点 E_1 抛出的土堡斜抛运动各参数: 土堡在 $t = 0.13$ s 时被抛出, 此时点 E_1 坐标为 (697 mm, 30 mm), 其 x 、 y 轴分速度为 0.626、9.672 m/s。

结合式 (13) ~ (17), 经过多次迭代分析, 确定罩壳参数 $l_x = 600$ mm、 $l_y = 434$ mm、 $l = 400$ mm 和 $\beta = 0^\circ$ 。求解出的经由铲尖点 E_1 抛出的土堡与罩壳碰撞的各参数: 土堡被抛出后经过 $t_2 = 0.043$ s 与罩壳发生碰撞, 碰撞时土堡在 x 、 y 轴的分速度为 0.626、9.251 m/s。

3 基于 EDEM-ADAMS 的耦合仿真与分析

面对稻茬田秸秆量大的作业工况, 作业机具需具有良好的秸秆埋覆性能。为此构建基于离散元方法的耕作装置-土壤-秸秆相互作用的仿真模型, 进行虚拟仿真试验以验证铲式种床整备机对秸秆的埋覆性能。本文利用离散元软件 EDEM 建立土壤与秸秆颗粒模型, 并通过多体动力学软件 ADAMS 定义铲式种床整备装置各零部件间的连接、运动关系, 将 EDEM 与 ADAMS 软件进行耦合以进行虚拟仿真试验。

3.1 铲式种床整备装置仿真模型建立

为减少仿真过程所花费的时间, 只取齿轮箱右侧 5 组铲式耕整地装置进行建模仿真, 同时考虑悬挂装置、开畦沟装置等对秸秆埋覆率影响较小, 利用 Pro/E 软件建立如图 11 所示幅宽为 970 mm 的仿真模型。

3.2 土壤-秸秆颗粒模型建立

采用 EDEM2020 建立离散元仿真模型, 选用球形颗粒模拟土壤和秸秆。在离散元仿真中, 较小的

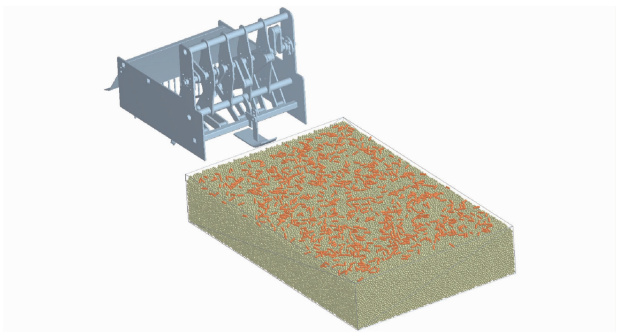


图 11 三维仿真模型
Fig. 11 3D simulation model

颗粒半径会导致仿真计算速度缓慢,且增加仿真占据的计算机内存空间,故仿真颗粒半径一般都大于实际土壤颗粒^[17-19],多数学者采用半径 8~10 mm 的颗粒作为土壤模型^[20-22],本文选用土壤颗粒半径为 8 mm,处于合理的范围内。土壤颗粒接触模型是离散元法的重要基础,其实质是准静态下颗粒固体的接触力学弹塑性分析结果^[23],接触模型的分析计算直接决定了颗粒受力和力矩,需对不同的仿真对象建立不同的接触模型,以提高仿真结果的准确性。为模拟稻茬地黏性土壤,设定土壤颗粒间的接触模型为 Hertz-Mindlin with Bonding。由于秸秆的高长径比及性质的各向异性,在离散元仿真中难以模拟,本文采用 5 个半径为 8 mm 的球形颗粒,设定其球心间隔为 10 mm,由此组成的长为 56 mm 的长线性模型作为秸秆颗粒。

为减少仿真过程中土槽侧面和底面对仿真结果的影响,建立长、宽、高为 2 400 mm×1 500 mm×400 mm 的土槽模型。且结合稻茬田的实际工况,将土槽模型分为耕层土壤和底层土壤两部分,根据田间实测数据,确定耕作层厚度为 160 mm,底层土壤厚度为 240 mm;对底层土壤进行压实,减小孔隙率;

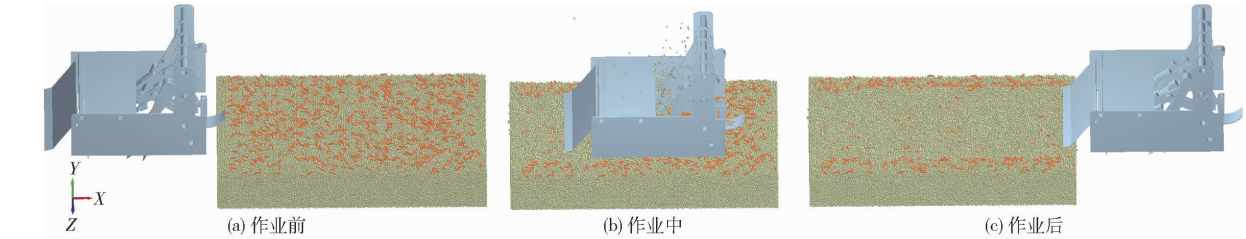


图 12 仿真过程
Fig. 12 Simulation process

3.4 仿真结果分析

3.4.1 秸秆埋覆率

为测定机具作业前后地表秸秆覆盖量的变化,利用 EDEM 软件 Geometry Bin 功能沿机具前进方向取作业平稳段,在表层均匀选取 3 处厚度为 40 mm、长度为 400 mm、宽度为 800 mm 的测量网格,隐藏土壤颗粒,保留秸秆颗粒,如图 13 所示;提取该区域机

耕层土壤随机生成,不做压实处理。秸秆颗粒采用随机生成的方式铺放在土壤表面。

仿真所用本征参数和接触参数主要通过文献^[18,20,24-25]和试验获得,其中,土壤、秸秆和钢泊松比分别为 0.37、0.4、0.3,密度分别为 2 315、241、7 865 kg/m³,剪切模量分别为 1.82×10⁶、1×10⁶、7.9×10¹⁰ Pa;模型接触参数如表 3 所示。

表 3 模型接触参数
Tab. 3 Contact parameters of model

参数	数值
土壤-土壤恢复系数	0.363
土壤-土壤静摩擦因数	0.422
土壤-土壤动摩擦因数	0.282
土壤-秸秆恢复系数	0.50
土壤-秸秆静摩擦因数	0.50
土壤-秸秆动摩擦因数	0.05
土壤-钢恢复系数	0.422
土壤-钢静摩擦因数	0.482
土壤-钢动摩擦因数	0.222
秸秆-钢恢复系数	0.30
秸秆-钢静摩擦因数	0.30
秸秆-钢动摩擦因数	0.01

3.3 仿真过程

将建立的机具仿真三维模型导入 ADAMS 软件,定义曲柄、连杆、摇杆、铲锹以及机架间的连接关系,设定曲柄转速为 240 r/min,前进速度为 0.45 m/s;导出耦合文件后在 EDEM 软件设置耕深为 200 mm, Rayleigh 时间步长为 15%,网格尺寸设置为最小颗粒半径的 2.5 倍,仿真总时间为 10 s;本次仿真累计生成 370 165 个土壤颗粒和 800 个秸秆颗粒,为区分秸秆与土壤,将秸秆颗粒设置为橙色;仿真过程和结果如图 12 所示。

具作业前、后地表秸秆颗粒质量分别为 W_q 、 W_h ,秸秆埋覆率计算式为

$$F_b = \frac{W_q - W_h}{W_q} \times 100\% \tag{18}$$

在 EDEM 后处理中测得的数据如表 4 所示,机具作业后平均秸秆埋覆率为 91.64%,表明铲锹式种床整备机能有效掩埋秸秆。

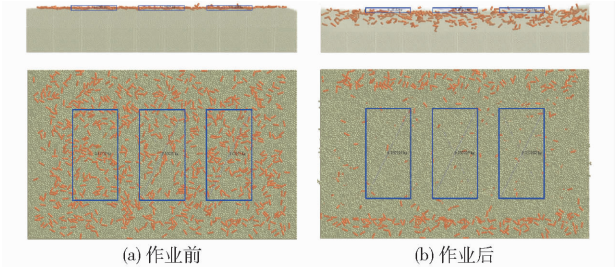


图 13 仿真作业前后秸秆分布

Fig. 13 Straw distribution before and after simulation operation

表 4 秸秆埋覆参数

Tab. 4 Straw burying parameters

位置	作业前秸秆 质量/kg	作业后秸秆 质量/kg	秸秆埋覆率/%
1	2. 08	0. 14	93. 27
2	1. 53	0. 16	89. 54
3	2. 03	0. 16	92. 12
均值	1. 88	0. 15	91. 64

3. 4. 2 秸秆在土壤中的垂直分布

机具作业后秸秆在深度方向上分布越均匀,则说明机具秸秆还田效果越理想。为分析作业后秸秆在土壤中的垂直分布情况,沿机具前进方向作业平稳段均匀取 3 个位置,每个位置在垂直方向上均匀设置 3 层计算区域,分别对应实际田间作业的垂直分层处理,每层计算区域尺寸为 400 mm × 800 mm × 70 mm,隐藏土壤颗粒,保留秸秆颗粒,如图 14 所示。统计每层区域所有秸秆质量,取 3 个位置的平均值作为上层、中层、下层秸秆质量,仿真结果如表 5 所示。

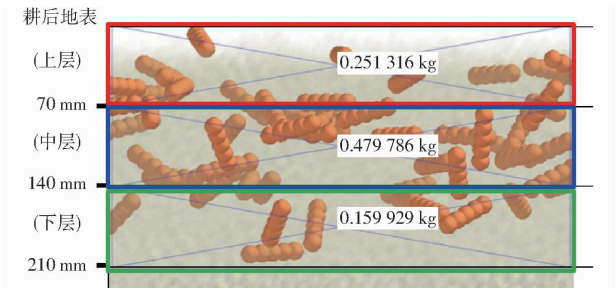


图 14 秸秆垂直分布

Fig. 14 Vertical distribution of straw

由表 5 可知,铲耨式种床整备机仿真作业后,上

表 5 作业后秸秆垂直分布

Tab. 5 Vertical distribution of straw after operation

位置	上层秸秆质量/ kg	中层秸秆质量/ kg	下层秸秆质量/ kg
1	0. 55	0. 45	0. 11
2	0. 32	0. 46	0. 23
3	0. 25	0. 48	0. 16
均值占比/%	37. 21	46. 18	16. 61

层、中层、下层秸秆所占百分比分别为 37. 21%、46. 18% 和 16. 61% ;观察仿真作业过程,秸秆和土壤被铲耨作业后抛向罩壳,在下落过程中与拦土耙碰撞,被拦下的秸秆与土壤沿拦土耙下落成为中下层,此部分秸秆为中下层秸秆主要来源;其余秸秆与土壤通过拦土耙后覆盖在深度为 0 ~ 70 mm 的上层,成为仿真作业后未被掩埋的秸秆主要来源。

综上表明:机具能有效掩埋秸秆,且拦土耙有助于将大部分秸秆埋入深层土壤,秸秆在垂直方向上分布也较为均匀,可适用于秸秆量大工况下的田间作业。

4 田间试验

4. 1 试验条件

为验证铲耨式种床整备机作业性能,于 2021 年 10 月在湖北省荆州市监利县稻-油轮作全程机械化生产示范基地开展田间试验,包括铲耨式种床整备机的作业性能试验,及其与仅有旋耕装置的 2BFQ - 8 型油菜直播机的对照试验。试验工况均为常年采用稻-油轮作模式的田块,其土壤类型为偏黏性土,前茬作物为水稻;试验工况参数如表 6 所示。

表 6 试验工况参数

Tab. 6 Test conditions parameters

参数	数值
平均土壤含水率/%	40. 82
土壤容重/(g · cm ⁻³)	1. 12
平均土壤坚实度/kPa	1 825
平均留茬高度/mm	369
秸秆量/(g · m ⁻²)	1 167
秸秆含水率/%	56. 15

试验设备包括东方红 954 型拖拉机、铲耨式种床整备机、TJSD - 9570 型数显土壤坚实度测定仪(浙江托普云农科技股份有限公司,精度 ± 0. 005% FS)、直尺(500 mm)、卷尺(5 m)、土壤取样环刀、电子天平、干燥箱等。

4. 2 试验方法

试验配套动力为东方红 954 型拖拉机。试验前通过调节拖拉机三点悬挂高度以及限深装置保证铲耨式种床整备机作业深度为 200 ~ 240 mm,调节拖拉机 PTO 输出转速为 540 r/min,调节拖拉机挡位和油门保证机具平均前进速度为 1. 62 km/h;2BFQ - 8 型油菜直播机试验耕深为 80 ~ 120 mm,调节拖拉机 PTO 输出转速、前进速度与上述保持一致。机组每个行程沿直线方向的作业距离为 50 m,取每个行程的中间 30 m 作为测量区域,每组试验重复 3 次。参考 NY/T 499—2013《旋耕机 作业质量》、GB/T 5668—2008《旋耕机》和 NT/Y 2709—2015《油菜播

种机 作业质量》，结合油菜种植农艺要求，确定以下试验指标：耕深及耕深稳定性系数、厢面平整度、碎土率以及秸秆埋覆率。

4.3 试验结果

如表 7 所示，铲锹式种床整备机和 2BFQ-8 型油菜直播机的耕深及其稳定性系数、厢面平整度和碎土率等各项评价指标均满足油菜播种要求；田间作业效果如图 15 所示。

表 7 试验结果
Tab.7 Test results

试验指标	铲锹式种床整备机	旋耕式油菜直播机
平均耕深/mm	215.30	116.10
耕深稳定性系数/%	92.83	91.88
厢面平整度/mm	16.90	20.30
碎土率/%	87.89	85.47
秸秆埋覆率/%	89.43	61.82



图 15 田间作业效果
Fig.15 Effects of field test

试验结果表明，铲锹式种床整备机的碎土率达 87.89%，且可有效掩埋秸秆，将其与土壤进行混埋，秸秆埋覆率为 89.43%，与仿真分析结果规律一致，表明铲锹式耕整地装置可有效切割水稻秸秆，并在罩壳与拦土耙的共同作用下，实现秸秆埋覆；同时由于螺旋线的曲柄排列方式及旋转曲柄安装位置远离地面秸秆，机组作业过程中不会出现缠绕堵塞现象，通过性能良好；由曲柄连杆机构带动铲锹对土壤作业后的平均耕深可达 215.3 mm，与传统旋耕方式相

比，耕深提高了 99.2 mm。

综上，在长江中下游稻油轮作区高茬秸秆的工况下，铲锹式种床整备机的秸秆埋覆率相比传统旋耕方式的油菜直播机提升 27.61 个百分点；且耕作深度为旋耕式油菜直播机的 1.8 倍，增加了耕作层深度，整机作业质量达到了稻茬地油菜直播种床整备的要求。

5 结论

- (1)为解决油菜直播种床整备作业时传统旋耕方式导致耕层浅、埋茬效果不足和平整度较低的问题，设计了一种通过主动铲锹切土、抛土动作，实现土壤翻耕、细碎、秸秆埋覆的铲锹式耕整地装置，并设计了集成被动式开畦沟、碎土、平整功能的适宜油菜直播的铲锹式种床整备机。
- (2)建立了曲柄连杆机构运动学模型，根据铲锹入土角、耕深、切土节距等要求，结合连杆机构特点，利用 Matlab 软件对曲柄连杆机构参数进行设计；确定了左右交错式铲锹和螺旋线的曲柄排列方式，并根据铲尖点运动轨迹、切土节距、沟底凸起高度等要求，得出机具前进速度 v_m 为 0.4 ~ 0.5 m/s、曲柄转速 n 为 240 r/min；对土壤被铲锹抛出后的运动过程进行了分析，确定了罩壳安装参数；建立了基于离散元方法的耕作部件-土壤-秸秆相互作用仿真模型，基于 EDEM 与 ADAMS 的耦合分析得出了机具的秸秆埋覆性能。
- (3)田间试验表明，在高茬水稻秸秆工况下，铲锹式种床整备机的平均作业耕深为 215.3 mm，与传统旋耕式油菜直播机相比，平均耕深提高 99.2 mm；秸秆埋覆率为 89.43%，相比传统的旋耕式油菜直播机，提升 27.61 个百分点，且作业过程不缠绕秸秆，整机作业质量达到了稻茬地油菜直播种床整备的要求。

参 考 文 献

[1] 吴崇友. 稻油(麦)轮作机械化技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.

[2] 国家统计局. 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报[R/OL]. (2021-02-28). http://www.stats.gov.cn/zjtj/zthd/lhfw/2021/lh_hgj/202103/t20210301_1814216.html.

[3] 孙文成, 廖庆喜, 张青松, 等. 驱动犁翻与反转旋耕组合式油菜直播种床整理机设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2020, 40(2): 1-10.

SUN Wencheng, LIAO Qingxi, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment on driven disc ploughing and reverse rotary tilling integrated machine for rapeseed seedbed preparation[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 40(2): 1-10. (in Chinese)

[4] ZHOU Hua, ZHANG Chunling, ZHANG Wenliang, et al. Evaluation of straw spatial distribution after straw incorporation into soil for different tillage tools[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104440.

[5] 邱进, 吴明亮, 官春云, 等. 动定刀同轴水稻秸秆切碎还田装置结构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 11-19.

QIU Jin, WU Mingliang, GUAN Chunyun, et al. Design and experiment of chopping device with dynamic fixed knife coaxial for rice straw[J]. Transactions of CSAE, 2015, 31(10): 11-19. (in Chinese)

[6] 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)
- [7] 廖宜涛,李玥宾,廖庆喜,等. 油菜精量联合直播机覆秸装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(5):52–62.
LIAO Yitao, LI Yuebin, LIAO Qingxi, et al. Design and test of straw gather-mulch device of combined precision rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 52–62. (in Chinese)
- [8] 张青松,廖庆喜,肖文立,等. 油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):702–711.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, XIAO Wenli, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 702–711. (in Chinese)
- [9] 肖文芳,舒彩霞,廖庆喜,等. 犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机设计与试验[J]. 华中农业大学学报,2019,38(6):139–146.
XIAO Wenfang, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Design and test of tillage machine combined with plough and rotary for managing seedbed before planting rapeseed by burying of rice straw incorporated into soil[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(6): 139–146. (in Chinese)
- [10] 魏国梁,张青松,刘立超,等. 犁旋组合式油菜直播机扣袋装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(6):38–46.
WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage buckle device for rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 38–46. (in Chinese)
- [11] 刘晓鹏,张青松,肖文立,等. 稻油轮作区驱动圆盘犁对置组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(12):33–41.
LIU Xiaopeng, ZHANG Qingsong, XIAO Wenli, et al. Design and experiment on symmetrical driven disc plows combined tillage machine for rice-rapeseed rotation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 33–41. (in Chinese)
- [12] 张文良,杜俊,张居敏,等. 犁旋式秸秆还田联合作业机设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2020,55(2):190–200.
ZHANG Wenliang, DU Jun, ZHANG Jumin, et al. Design and test of the plough and rotary burying straw returning combine [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020, 55(2): 190–200. (in Chinese)
- [13] 贾洪雷,陈忠亮,刘昭辰,等. 耕整联合作业工艺及配套机具的研究[J]. 农业机械学报,2001,32(5):40–43.
JIA Honglei, CHEN Zhongliang, LIU Zhaochen, et al. Study on technology and maching machine for rototilling-tillage combined operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(5): 40–43. (in Chinese)
- [14] 贾洪雷,马成林,刘枫,等. 秸秆与根茬粉碎还田联合作业工艺及配套机具[J]. 农业机械学报,2005,36(11):46–49.
JIA Honglei, MA Chenglin, LIU Feng, et al. Study on technology and matching for stalk/stubble breaking and mulching combined operation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 46–49. (in Chinese)
- [15] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上)[M]. 北京:中国农业机械出版社,2007.
- [16] 李宝筏. 农业机械学[M]. 2版. 北京:中国农业出版社,2018.
- [17] UCGUL M, JOHN M F, CHRIS S. Three dimensional discrete element modeling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystem Engineering, 2015, 129: 298–306.
- [18] 周华,李栋,刘政源,等. 秸秆旋埋还田后空间分布效果仿真与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(9):69–77.
ZHOU Hua, LI Dong, LIU Zhengyuan, et al. Simulation and experiment of spatial distribution effect after straw incorporation into soil by rotary burial[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 69–77. (in Chinese)
- [19] LI B, CHEN Y, CHEN J. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM) [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 158: 34–41.
- [20] 方会敏,姬长英,TAGAR A A,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, TAGAR A A, et al. 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)
- [21] 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)
- [22] 郑侃,何进,李洪文,等. 反旋深松联合作业耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(8):61–71.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of combined tillage implement of reverse-rotary and subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 61–71. (in Chinese)
- [23] 胡建平,周春健,侯冲,等. 磁吸板式排种器充种性能离散元仿真[J]. 农业机械学报,2014,45(2):94–98.
HU Jianping, ZHOU Chunjian, HOU Chong, et al. Simulation analysis of seed filling performance of magnetic plate seed metering device by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 94–98. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 祝英豪,夏俊芳,曾荣,等. 基于离散元的稻田田旋耕功耗预测模型研究[J]. 农业机械学报,2020,51(10):42–50.
ZHU Yinghao, XIA Junfang, ZENG Rong, et al. Prediction model of rotary tillage power consumption in paddy stubble field based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 42–50. (in Chinese)