

平行犁组翻扣与旋耕组合式油菜种床制备装置研究

廖庆喜^{1,2} 张季钦^{1,2} 张青松^{1,2} 杜文斌^{1,2} 林建新^{1,2} 王立宗^{1,2}

(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, 油菜直播机采用普通旋耕时易导致种床耕层浅、秸秆埋覆率低, 现有犁旋一体机作业时纵向尺寸大的问题, 结合油菜直播农艺要求和合理耕层构建需求, 设计了一种平行扣垡犁组, 提出了一种“圆盘犁刀切茬-压茬, 平行犁组翻扣埋茬, 旋耕刀辊碎土-匀土”的组合式耕整作业方案。采用直纹面法对扣垡犁的犁体曲面进行设计, 构建了犁体曲面解析参数方程, 建立了基于离散元方法的耕作部件-土壤-秸秆互作仿真模型, 应用 EDEM 软件开展了二次正交旋转试验, 分析了扣垡犁扣垡性能。仿真结果表明: 当偏转角 θ 取 12° 、元线角差值 $\Delta\theta$ 取 11° 时, 犁体扣垡效果最优。田间试验结果表明: 当耕深为 230 mm、作业速度为 5.15 km/h 时, 扣垡犁平均扣垡率为 91.3%, 有较好埋茬效果; 平行扣垡犁组在高茬秸秆工况下有较好的通过性, 秸秆平均埋覆率达到 82.5%, 平均耕深达到 218.6 mm, 耕深稳定性系数达到 90.2%。田间对比试验结果表明: 在水稻收获后平均留茬高度为 513 mm 的工况下, 平行犁组翻扣与旋耕组合式油菜种床制备装置平均耕深达 229.7 mm, 秸秆埋覆率为 87.5%, 碎土率为 89.7%, 厢面平整度为 31.8 mm, 相比于普通旋耕机作业效果, 平均耕深增大 90.9 mm, 秸秆埋覆率和碎土率分别提高 7.2 个百分点和 6.5 个百分点, 作业质量满足油菜播种要求, 符合油菜“深翻埋茬, 上松下紧”的种床合理耕层构建要求。

关键词: 油菜; 种床制备装置; 犁体曲面; 平行扣垡犁组; 犁旋

中图分类号: S223.2*5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)10-0190-12

OSID:



Design and Test of Rapeseed Seed Bed Preparation Device Combined with Parallel Plow Group Turnbuckle and Rotary Tillage

LIAO Qingxi^{1,2} ZHANG Jiqin^{1,2} ZHANG Qingsong^{1,2} DU Wenbin^{1,2} LIN Jianxin^{1,2} WANG Lizong^{1,2}

(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: Considering the problems of soil in mid-lower reaches of the Yangtze River is sticky and the amount of straw is large, the utilization of conventional rotary tillage rapeseed direct-seeding machines often leads to the plough layer is shallow and the straw coverage rate is low, the longitudinal size of the existing combination of plowing and rotary tillage rapeseed seeder is generally larger, the rapeseed direct-seeding agronomic requirement and the requirement were combined to build reliable plough layer, a parallel mounted buckling plow group was designed, a combined tillage operation scheme of “disc plow blade cutting and pressing stubble, parallel plow group turning over soil and burying stubble, the rotary tiller knife roll breaks up the clod and equalizes the soil” was proposed. The plough surface of the buckling plow was designed by using the method of straight ruled surface, the parametric analytical equation of plough surface was established, a simulation model for the interaction between tillage tool, soil, and straw was established based on the discrete element method, and the quadratic orthogonal rotation test was carried out to analyze the buckling performance of the buckling plow by using EDEM software. The simulation results showed that when the deflection angle θ was 12° and the change value $\Delta\theta$ was 11° , the buckling effect of the plough body was the best. Field experiments showed that the average soil buckling rate was 91.3% when the tilling depth was 230 mm and the forward velocity was 5.15 km/h,

收稿日期: 2023-12-28 修回日期: 2024-01-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000405)、财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-12)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

and the buckling plough had a good stubble burying effect. The parallel buckling plough group had good through performance under high crop straw conditions, with an average straw coverage rate of over 82.5%, an average tillage depth of over 218.6 mm, and a stability coefficient of over 90.2% for tillage depth. Field comparison experiment showed that under the condition of average stubble height of 513 mm after rice harvest, the average depth of rapeseed seed bed preparation device combined with parallel plow group turnbuckle and rotary tillage was 229.7 mm, the straw coverage rate was 87.5%, the soil breaking rate was 89.7%, and the planter bed surface flatness was 31.8 mm, compared with the operation effect of conventional rotary tillage, the average ploughing depth was increased by 90.9 mm, the straw coverage rate and soil breaking rate were increased by 7.2 percentage points and 6.5 percentage points, respectively, and the operation quality met the requirements of rapeseed direct-seeding, and met the requirements of reasonable cultivation layer construction of rapeseed seed bed of “deep turning and stubble burying, upper looseness and lower tightness”.

Key words: rapeseed; seed bed preparation device; plow surface; parallel buckling plough group; plowing and rotary tilling

0 引言

长江中下游地区是我国冬油菜主产区,该地区种植模式主要以稻-油水旱轮作的模式为主^[1]。油菜直播时地表残留稻茬较高,秸秆量大,韧性强,短时间内难以腐化。普通旋耕机在稻茬地作业时容易出现缠草堵塞、耕作层较浅、秸秆埋覆率低等问题,会造成种床厢面平整度较低,影响冬油菜播种效果^[2-5]。当前实际生产中采用先全幅犁翻埋茬再旋耕碎土的耕作方式进行种床制备,可以打破长期稻油轮作形成的较浅犁底层,改善土壤板结和肥力分布不均的状况,疏松耕作层,提高土壤墒情,但是需要机具多次下地,会对土壤产生多次碾压,不利于节约成本^[6-8]。因此,开展复式耕整地技术与装备的研究是制备合理种床的有效途径。

种床制备装置可以为种子生长提供良好的生长环境,其作业质量直接影响作物的生长状况和产量^[9]。国内学者在复式耕整地直播机种床制备装置的主动和被动部件排布、参数匹配、降低功耗等方面取得了较多的成果,为解决复杂田间状况、构建适宜种床提供了参考^[10-15]。国外由于油菜一般在旱地大面积连片种植,土壤工况较好,复式种床制备装置多为免耕播种作业^[2],机具幅宽大、触土工作部件多采用被动式^[16-17],不适用于长江中下游地区田间作业。国内外目前对犁体翻扣过程和整机尺寸的匹配研究较少,现有复式耕整机具纵向尺寸较长、转弯半径大且不便运输和储存。因此,开发一种结构紧凑的平行犁组翻扣与旋耕组合式油菜种床制备装置,在不降低工作效率的基础上,减小整机纵向尺寸,将机具重心前置,增加机具适应性。

本文针对长江中下游稻-油轮作区冬油菜播种时,水稻秸秆留茬高且浮草多,普通旋耕机埋茬率有待进一步提高的问题,结合油菜生长农艺要求,考虑

整机纵向尺寸和适应性,设计一种平行扣袋犁组,并集成油菜直播机,一次性完成前茬秸秆切割、扣袋埋茬、施肥、开两侧畦沟、平整厢面和播种等多道作业工序。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

平行犁组翻扣与旋耕组合式油菜种床制备装置是油菜直播机的主要耕整装置,主要由平行扣袋犁组、旋耕装置、开畦沟装置、主动镇压装置等组成。其中,平行扣袋犁组包括 4 个平行排布的扣袋犁和与其配合的圆盘犁刀;开畦沟装置包括对称布置的前后组合式铧式犁;旋耕装置包括中央齿轮箱、左右旋耕刀辊和机架。整机结构如图 1 所示,其技术参数如表 1 所示。

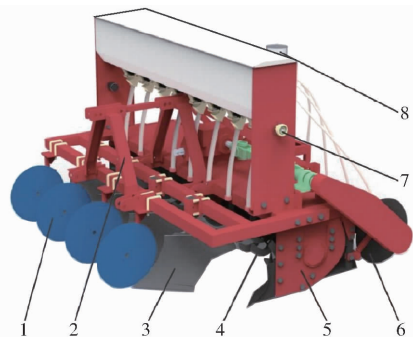


图 1 油菜直播机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of rape direct seeding machine

1. 圆盘犁刀 2. 三点悬挂装置 3. 扣袋犁 4. 旋耕装置 5. 开畦沟装置 6. 主动镇压装置 7. 施肥系统 8. 排种系统

1.2 工作原理

油菜直播机与轮式拖拉机配套使用。机组作业时,首先通过圆盘犁刀将地面上的稻茬秸秆和浮草进行切断和下压,再通过扣袋犁将土袋和前茬秸秆向机具前进方向的左侧翻扣;旋耕装置对翻扣后土壤及秸秆进行运移和进一步细碎;同时,对布置于旋

表1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
整机外形尺寸(长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	1 560×2 500×1 600
整机工作幅宽/mm	2 500
配套动力/kW	≥89.48
作业速度/(km·h ⁻¹)	4~8
扣袋犁数量/个	4
扣袋犁工作幅宽/mm	400
扣袋犁间距/mm	500
犁耕深度/mm	210~250
旋耕幅宽/mm	2 500
旋耕深度/mm	100~150
开畦沟宽度/mm	250~300
开畦沟深度/mm	180~200

耕装置两侧的开畦沟装置完成开沟作业;再由中央齿轮箱侧向传递动力的主动镇压辊将厢面平整并开出种沟,形成适宜油菜播种的种床厢面。整机作业工艺方案示意图如图2所示。

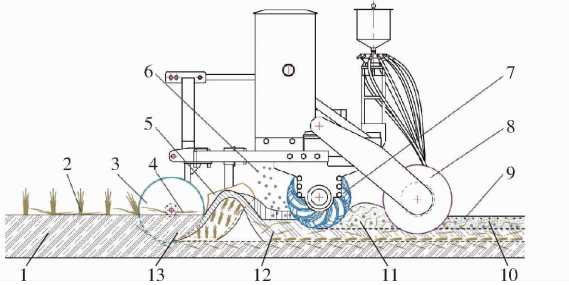


图2 整机作业工艺方案示意图

Fig.2 Schematic of machine operation process scheme

1. 未耕地
2. 留茬秸秆和浮草
3. 圆盘犁刀
4. 切断的秸秆和浮草
5. 扣袋犁
6. 肥料
7. 旋耕刀辊
8. 主动镇压辊
9. 种子
10. 镇压后种床
11. 旋耕后土壤
12. 翻扣后的土堡
13. 下压的秸秆和浮草

2 关键部件设计与分析

2.1 扣袋犁犁体曲面设计与分析

2.1.1 犁体曲面形成原理

扣袋犁采用窜袋的形式对土堡进行翻转,其中犁体曲面是扣袋犁对土壤完成扣翻和松碎的主要工作部件。犁体曲面结构由犁铧、犁胸和犁翼3部分组成,犁铧用于破土和切土形成土堡,犁胸用于提升和扭转土堡,犁翼用于对土堡进一步翻转,最终将土堡向犁体侧后方抛撒并使其悬空翻扣落在耕后地表,实现对高茬秸秆的翻埋。

本文采用直纹面原理^[18]对犁体曲面进行构建,如图3所示。图中 θ_x 为元线角, θ 为导向曲线所在平面绕Y轴偏转角, θ_0 为犁铧安装角。建立三维坐标系,空间直母线 AA_0 沿着空间内的导向曲线 $ABCD$ 以单位向量变化规律自下至上运动,形成犁体曲面。犁体曲面的解析方程为

$$\mathbf{r}(u, v) = \mathbf{a}(u) + v\mathbf{b}(u) \quad (1)$$

式中 $\mathbf{a}(u)$ ——导向曲线向量

$\mathbf{b}(u)$ ——直母线单位向量

v ——直母线长度

u ——Y轴方向单位长度

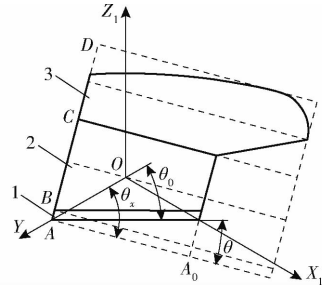


图3 犁体曲面结构示意图

Fig.3 Schematic of structure of plow body

1. 犁铧
2. 犁胸
3. 犁翼

2.1.2 扣袋犁犁体曲面参数设计与分析

根据式(1)扣袋犁犁体曲面形成原理可知,犁体曲面的工作性能主要受导向曲线参数、导向曲线所在平面绕Y轴偏转角 θ 、母线长度和单位向量变化规律所影响。本文为了保证扣袋犁在犁翼部分能够使土堡悬空翻扣,将地表高茬秸秆有序扣埋,采用了圆弧形导向曲线^[19],建立了导向曲线数学坐标模型,如图4所示。

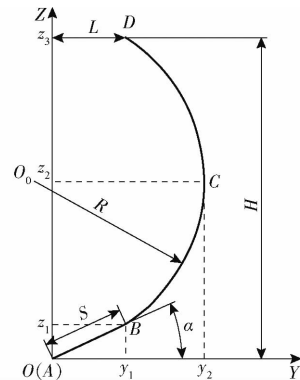


图4 导向曲线形状与参数

Fig.4 Guide curve shape and parameters

图4中 AB 段为直线,对应犁铧部分; BC 段为窜袋曲线,易于土堡的拾升和翻转; CD 段为扣袋曲线,易于土堡的翻扣。取导向曲线各端点坐标 $A(0,0)$ 、 $B(y_1, z_1)$ 、 $C(y_2, z_2)$ 、 $D(y_3, z_3)$, R 为圆弧半径, $O_0(y_0, z_2)$ 为圆弧圆心,其中过渡连接点 B 、 C 均采用平滑处理。由图4可知,导向曲线参数方程为

$$z = \begin{cases} y_1 \tan \alpha & (0 \leq z \leq z_1) \\ z_2 - \sqrt{R^2 - (y + R - y_2)^2} & (z_1 < z \leq z_2) \\ z_2 + \sqrt{R^2 - (y + R - y_2)^2} & (z_2 < z \leq z_3) \end{cases} \quad (2)$$

由图4中的几何关系可得

$$\begin{cases} y_0 = L_1 - R \\ y_1 = S \cos \alpha \\ z_1 = S \sin \alpha \\ y_2 = L_1 \\ z_2 = H_1 \\ y_3 = L_2 \\ z_3 = H_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$R = \frac{H_1^2 + H_2^2 + L_2^2 + L_1^2 - 2L_2L_1 - 2H_2H_1}{2(L_1 - L_2)} \quad (4)$$

式中 z ——导向曲线上点 Z 轴坐标, mm
 y ——导向曲线上点 Y 轴坐标, mm
 S ——犁铧长度, mm
 α ——犁体入土角, ($^\circ$)
 L_1 ——窜垡曲线开度, mm
 H_1 ——窜垡曲线高度, mm
 L_2 ——扣垡曲线开度, mm
 H_2 ——扣垡曲线高度, mm

基于窜垡原理,使土垡侧向翻扣为目的,参考《农业机械设计手册》^[20]对扣垡犁导向曲线进行设计,取犁体入土角 α 为 25° ,犁刃长度 S 为 70 mm,窜垡曲线开度 L_1 取 235.5 mm,窜垡曲线高度 H_1 取 300 mm,扣垡曲线开度 L_2 取 113.7 mm,扣垡曲线高度 H_2 取 540 mm,代入式(3)、(4)中可得 $R = 298$ mm。

将导向曲线参数方程转入空间坐标系 OX_1YZ_1 中,可得导向曲线空间坐标模型,如图 5 所示。

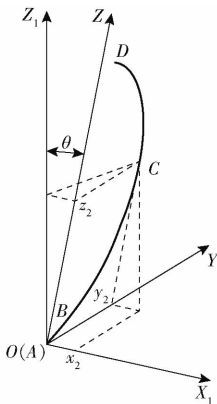


图 5 导向曲线空间位置示意图

Fig. 5 Schematic drawing of guide curve spatial position

导向曲线向量为

$$a(u) = \begin{cases} (0.466u \sin \theta, u, 0.466u \cos \theta) \\ \rho_{AB} + ([300 - \sqrt{298^2 - (u + 62.5)^2}] \sin \theta, u, [300 - \sqrt{298^2 - (u + 62.5)^2}] \cos \theta) \\ \rho_{BC} + ([300 + \sqrt{298^2 - (u + 62.5)^2}] \sin \theta, u, [300 + \sqrt{298^2 - (u + 62.5)^2}] \cos \theta) \end{cases} \quad (5)$$

式中 ρ_{AB} ——向量 AB ρ_{BC} ——向量 BC

直母线单位向量 $b(u)$ 的变化对直纹面的形状有较大的影响,由图 5 可知平面 YOZ_1 与平面 YOZ 之间的偏转角 θ 为定值, θ_x 为直母线元线角,直母线单位向量可表示为

$$b(u) = (\sqrt{\cos^2 \theta - \cos^2 \theta_x}, \cos \theta_x, -\sin \theta) \quad (6)$$

将式(5)和式(6)代入式(1)可知, θ 和 θ_x 的取值会对犁体曲面的形成产生较大的影响,进而影响扣垡犁的作业性能。

根据文献[21]和油菜种床合理耕层构建要求,机具作业时犁耕深度需大于 200 mm,选取扣垡犁工作宽度为 300 mm,因为土壤之间存在撕扯性^[22],满足 400 mm 横向幅宽土垡扣垡作业,为了使土垡在扣垡阶段有较大的翻转扭矩,宽深比 K 应在 1.5 ~ 1.96 之间^[23],计算可得对应耕深为 204.1 ~ 266.7 mm。由于犁耕深度越大机械能耗越大,且土壤耕层在 200 ~ 250 mm 时作物增产显著^[24],所以耕深 h 取 204 ~ 250 mm。在工作宽度一定时, θ_0 越大犁铧切土阻力越大, θ_0 越小犁铧越长,为了使犁铧尺寸和切土阻力适中, θ_0 取 45° ,此时犁铧宽度为 424 mm。

根据预试验可知,当犁体扣垡高度和犁体宽度确定时, θ 取值越大土垡随犁体曲面窜垡高度就越小。且当窜垡高度不足以支持土垡悬空翻扣时,土垡会在犁翼部分产生拥堵,增大扣垡犁作业阻力。忽略秸秆与土壤之间的支撑力, θ 满足关系式

$$\begin{cases} h_{\max} < \frac{H_2 \cos \theta}{2} \\ \theta \geq 0^\circ \end{cases} \quad (7)$$

式中 h_{\max} ——最大耕深, mm

计算可得: $0^\circ \leq \theta \leq 22.2^\circ$ 。

为了使扣垡犁有较好的覆盖能力和较小的作业阻力,参考文献[25]各元线角的确定,取元线角 θ_x 变化规律关系如图 6 所示,在起土阶段角度不变, $\theta_x = \theta_1$,窜垡与扣垡段逐渐减小,且在窜垡过程中减小较缓慢,在扣垡过程中减小较快,满足抛物线函数式

$$\begin{cases} \cos \theta_1 = \cos \theta \cos \theta_0 \\ \theta_x = \frac{z^2}{2a} \\ \theta_3 = \theta_1 - \Delta \theta \end{cases} \quad (8)$$

式中 a ——常数

θ_3 ——最小元线角, ($^\circ$)

$\Delta \theta$ ——元线角差值, ($^\circ$)

$\Delta \theta$ 取值范围为 $7^\circ \sim 15^\circ$, θ_x 的取值受 $\Delta \theta$ 与 θ 影响较大。

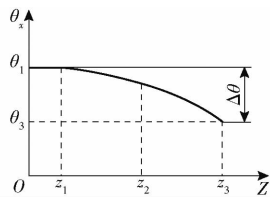


图6 夹角变化曲线

Fig. 6 Curve of angle change

2.2 平行扣垡犁组排布设计

如图7所示,平行扣垡犁组主要由机架、4个圆盘犁刀和4个扣垡犁组成,图中 L_b 为机架前后梁间距。圆盘犁刀和扣垡犁平行均布在机架前后两横梁上,可减少犁体间三角区域^[26],缩短犁组纵向尺寸。扣垡犁采用加强筋代替犁柱、犁托和犁侧板对犁体曲面进行加固,节约了扣垡犁间的空间,通过调节犁体间安装间距,可避免扣垡犁作业时产生拥堵。

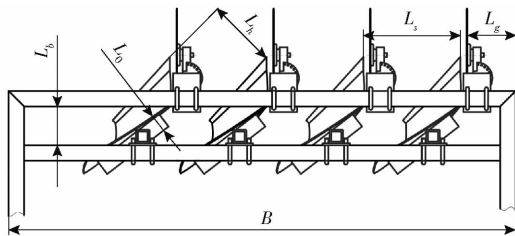


图7 平行扣垡犁组排布示意图

Fig. 7 Schematic of parallel buckle mechanism arrangement

圆盘犁刀与扣垡犁安装位置如图8所示,图中 c_1 为圆盘犁刀与扣垡犁安装间距, c_3 为圆盘犁刀与犁尖前后宽度差。圆盘犁刀作业时可将地表稻茬秸秆切断,并将地表柔性浮草压至犁尖以下。为防止侧边扣垡犁缠草造成堵塞,要求圆盘犁刀最低点应位于犁尖前方,且作业深度大于扣垡犁最大作业深度。

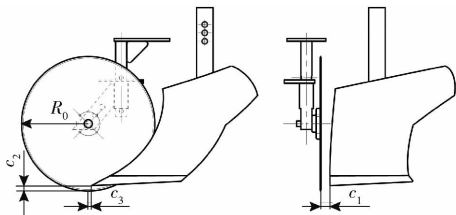


图8 圆盘犁刀与扣垡犁安装位置示意图

Fig. 8 Installation diagram of disc coulters and buckling plough

圆盘犁刀作业深度计算公式为

$$R_0 = h_{\max} + c_2 \quad (9)$$

式中 R_0 ——圆盘犁刀半径,mm

c_2 ——圆盘犁刀与犁尖深度差,mm

参考《农业机械学》关于圆盘犁刀设计,取 c_2 为20 mm, c_3 为30 mm,计算可得 R_0 为270 mm。根据圆盘犁刀与扣垡犁结构参数和安装位置关系,取机架前后横梁间距 L_0 为200 mm。

为了保证圆盘犁刀能够正常工作,避免因圆盘犁刀与扣垡犁之间堵土造成犁刀无法正常旋转,取圆盘犁刀与扣垡犁横向安装间距 c_1 为40 mm。

扣垡犁作业时,可将带有秸秆的土垡蹿升并向犁体侧后方抛送使其悬空翻扣,土垡运移轨迹如图9所示。

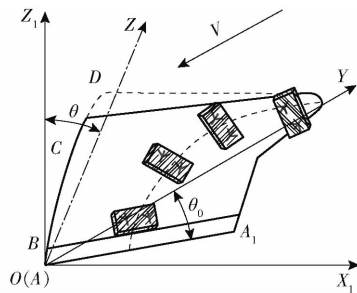


图9 土垡运移轨迹

Fig. 9 Soil movement trajectory

为了保证犁体扣垡作业时不受侧边犁体干扰,犁体安装间距应满足

$$\begin{cases} L_s \cos \theta_0 = L_h \\ L_h > h_{\max} + L_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中 L_s ——犁体安装间距,mm

L_h ——犁体间铧刀线法线方向间距,mm

L_0 ——犁体曲面加强筋与犁柱宽度,mm

已知 L_0 为84.84 mm,且土壤间存在撕扯性,扣垡犁安装间距 L_s 应大于400 mm,计算可得 L_h 大于473.5 mm。

根据油菜直播农艺要求,油菜播种前开畦沟装置需开出宽250~350 mm的畦沟排水^[27]。为了满足扣垡犁和开畦沟装置作业需求,取 L_s 与 L_g 分别为500、250 mm,代入公式

$$B = 2L_g + 4L_s \quad (11)$$

式中 B ——平行扣垡犁组机架宽度,mm

L_g ——畦沟区域宽度,mm

计算可得平行扣垡犁组理论作业幅宽为2500 mm。

2.3 旋耕刀片选取与排布设计

由于平行扣垡机构作业时土壤依次向机具前进方向的左侧翻扣,厢面整体呈现出左高右低的现象,为了构建适宜油菜直播要求的合理种床,还需要运用旋耕装置对犁耕后表层厚100~150 mm土壤进一步细碎^[13],并向厢面右侧输送,犁旋配合作业示意图如图10所示。

旋耕装置中的刀辊可分为左刀辊和右刀辊,且两刀辊呈对称状分布于旋耕装置中。旋耕刀按照双头螺旋线排列在左、右刀辊上,螺旋线升角相同,且左刀辊螺旋线左旋、右刀辊螺旋线右旋。为实现犁翻后土壤进一步细碎和右侧输送的功能,满足油菜直播机旋耕深度要求,参考BG/T 5669—2017《旋耕

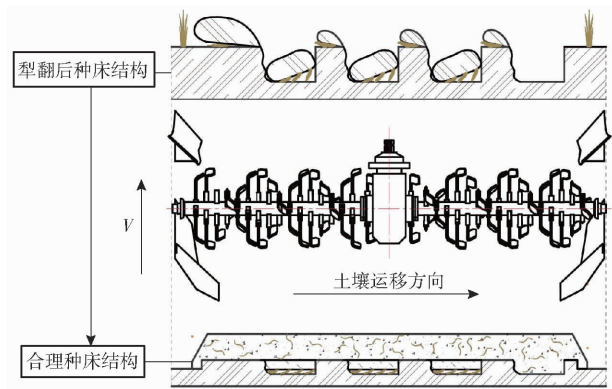


图 10 犁旋配合作业示意图

Fig. 10 Diagram of plow-rotary tillage operation

机械刀与刀座》，选取左右刀辊上的旋耕刀均为 II T245 型右弯刀。作业时，单个旋耕刀作余摆线运动，将切碎后的土块向刀片右后方抛撒，达到平整厢面的目的。

为了避免刀辊上同一平面内切土节距过小而堵塞，同一刀辊上两螺旋线间的夹角取 180° ，同一螺旋线上相邻两刀片安装偏角为 70° ，安装距离计算式为

$$b' = b + \Delta b \quad (12)$$

式中 b' ——旋耕刀安装间距, mm

b ——旋耕刀作业宽度, mm

Δb ——旋耕刀安装间距与作业宽度差值

旋耕刀安装间距应大于旋耕刀的工作幅宽，II T245 型旋耕刀耕宽 $45 \sim 55$ mm, Δb 通常取 $15 \sim 20$ mm^[20]，经计算 $b' = 70$ mm。

旋耕机刀辊上安装刀片总数计算式为

$$N = \frac{B - \Delta B}{b'} + 2 \quad (13)$$

式中 N ——左(右)刀辊上旋耕刀总数, 取偶数

ΔB ——齿轮箱宽度, mm

已知齿轮箱宽度 230 mm, 经式(13)计算可得出左、右刀辊各安装 34 把旋耕刀较为合理。左右两刀辊初始位置角度差计算式为

$$\Phi = \frac{180^\circ}{N} \quad (14)$$

式中 Φ ——左右刀辊初始位置角度差, ($^\circ$)

经计算可得左右两刀辊初始位置角度差 $\Phi = 5.3^\circ$, 为方便加工制造, 取 Φ 为 6° 。旋耕刀片排布示意图如图 11 所示。

3 仿真分析

扣袋犁作业时, 土堡随着犁体曲面进行蹿升和扭转, 最终悬空翻扣将土堡表面的秸秆翻埋。根据上述分析可知, 直母线元线角 θ_x 和偏转角 θ 是扣袋犁犁体曲面形成的关键因素, 其中 θ_x 的取值受元线

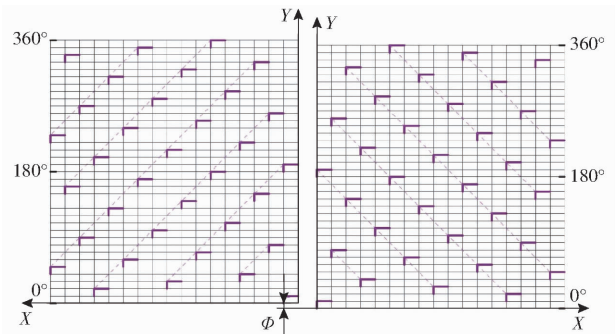


图 11 旋耕刀片排布方式

Fig. 11 Arrangement method of rotary tillage blades

角差值 $\Delta\theta$ 和 θ 影响较大。为了探究犁体曲面的结构参数 $\Delta\theta$ 和 θ 的取值与扣袋犁作业性能之间的关系, 验证扣袋犁的窜袋、扣袋效果, 应用 EDEM 软件构建机具-土壤-秸秆力学仿真模型, 开展二次正交试验。通过分析扣袋犁作业后土壤、秸秆分布状态, 确定扣袋犁犁体曲面最优结构参数。

3.1 仿真模型建立

使用 EDEM 软件构建土壤-秸秆离散元模型, 假定土壤和秸秆均由大小相等的球状颗粒组成, 忽略土壤中的石块、砂粒等杂质^[28]。土壤接触模型的选择会对仿真结果的准确性产生较大的影响, 为了模拟长江中下游地区稻茬地重黏性土壤, 仿真使用 Hertz-Mindlin with Bonding 模型。为了增加仿真运行速度、减小运算数据, 仿真颗粒一般大于土壤颗粒, 选用土壤半径为 5 mm^[29]。秸秆采用 15 个半径为 5 mm 的球形颗粒串连成的 100 mm 长条模型来模拟^[30]。

建立长 \times 宽 \times 高为 3 000 mm \times 1 000 mm \times 300 mm 的土槽模型, 通过重力沉积的方法将土壤颗粒填充到虚拟土槽中生成 300 mm 厚的土壤层。根据田间实测数据, 可将土壤层分为耕作层和犁底层, 其中厚度 0 ~ 150 mm 的区域为耕作层, 150 ~ 300 mm 区域为犁底层。生成土壤模型时, 可将耕作层等分成 3 层, 每层厚度为 50 mm, 并通过 3 种颗粒进行标记^[31]。秸秆颗粒通过颗粒工厂生成, 均匀铺放在土壤层上。

仿真所用材料参数和模型接触参数主要通过文献和试验获得^[29, 32-33], 其中, 土壤参数设置为: 泊松比 0.37、密度 2 315 kg/m³、剪切模量 1.82×10^6 Pa; 秸秆参数设置为: 泊松比 0.4、密度 241 kg/m³、剪切模量 1×10^6 Pa; 钢参数设置为: 泊松比 0.3、密度 7 865 kg/m³、剪切模量 7.9×10^{10} Pa。模型接触参数如表 2 所示。

3.2 仿真试验方案

为探究犁体曲面主要参数对作业性能的影响, 采用两因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验

表2 模型接触参数

Tab.2 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	0.5
土壤-秸秆静摩擦因数	0.5
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	0.3
秸秆-钢静摩擦因数	0.3
秸秆-钢动摩擦因数	0.01

方法,以偏转角 θ 和元线角差值 $\Delta\theta$ 为试验因素,扣袋效果为评价指标,根据上述设计与分析确定试验因素取值范围:偏转角 θ 为 $0^\circ \sim 22^\circ$ 、元线角差值 $\Delta\theta$ 为 $7^\circ \sim 15^\circ$,试验因素编码如表3所示。根据试验因素编码组合和上述设计的其余犁体曲面结构参数,运用 Solidworks 对扣袋犁进行建模,并将简化后的模型导入到土壤-秸秆模型中。在 EDEM 软件中调整扣袋犁耕深为 210 mm,添加直线运动,设置作业速度为 1.1 m/s,仿真过程如图12所示。

表3 试验因素编码

Tab.3 Experimental factors codes

编码	因素	
	偏转角 $\theta/(^\circ)$	元线角差值 $\Delta\theta/(^\circ)$
-1.414	0	7
-1	3.22	8.17
0	11	11
1	18.78	13.83
1.414	22	15

3.3 仿真试验结果

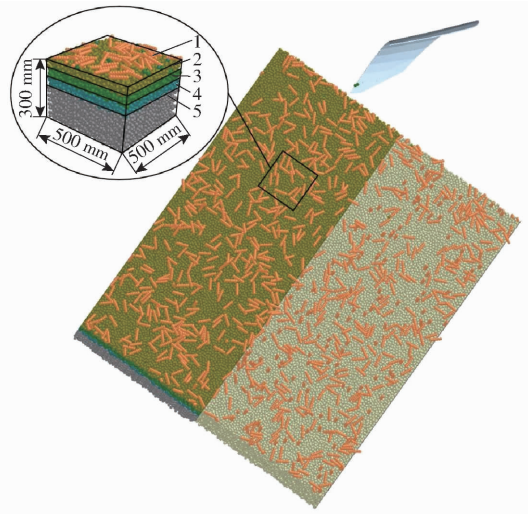
3.3.1 评价指标

为测定扣袋犁扣袋效果,运用 EDEM 软件 Geometry Bin 功能沿着扣袋犁前进方向取作业平稳段,在扣袋后地表分别选取3个长度为200 mm、宽度为600 mm、高度为300 mm的网格作为测量区域,并将每个测量区域等分成上、中、下层,如图13所示。

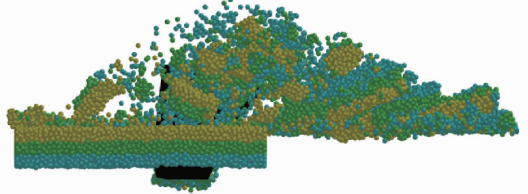
提取最下层测量区域和整体测量区域中耕作层表面土壤的质量,将最下层测量区域的表土质量作为被埋覆质量。计算扣袋犁作业后土袋表面土壤埋覆率,取平均值。计算公式为

$$r = \frac{W_h}{W_q} \times 100\% \quad (15)$$

式中 r ——表层土壤埋覆率, %



(a) 仿真模型



(b) 耕作层土壤颗粒运移过程

图12 仿真过程

Fig.12 Simulation process

1. 秸秆颗粒
2. 耕作层表面土壤颗粒
3. 耕作层中间土壤颗粒
4. 耕作层底部土壤颗粒
5. 犁底层土壤颗粒

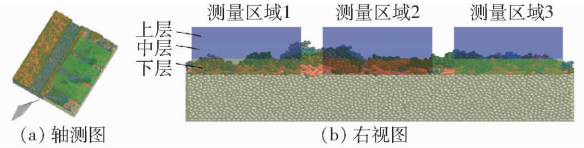


图13 评价指标测量区域示意图

Fig.13 Schematic of evaluation index measurement area

W_h ——下层测量区域中表土质量, kg

W_q ——整体测量区域中表土质量, kg

扣袋犁作业时可将土袋蹿升并使其悬空翻扣,当翻扣后的土袋中表面土壤埋覆率越大,说明扣袋犁扣袋效果越好,反之扣袋效果越差。

3.3.2 试验结果与分析

在 EDEM 后处理中测得的数据与方差分析结果如表4、5所示。

应用 Design-Expert 软件对试验数据进行分析处理,由方差分析结果可知,模型显著性试验 F 值为 2367.19, P 值小于 0.001, 决定系数 R^2 为 0.9992, 表明回归模型显著、拟合程度较好。

犁面偏转角 θ 和元线角差值 $\Delta\theta$ 均对扣袋犁扣袋效果有显著影响,通过二次多元回归拟合的回归模型为

$$r = -133.4 + 2.92\theta + 36.5\Delta\theta - 0.012\theta\Delta\theta - 0.11\theta^2 - 1.61(\Delta\theta)^2 \quad (16)$$

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Design and results of experiments

试验 序号	因素		表层土壤埋 覆率 $r/\%$
	偏转角 $\theta/(\circ)$	元线角差值 $\Delta\theta/(\circ)$	
1	3.22	8.17	65.3
2	18.78	8.17	71.9
3	3.22	13.83	72.1
4	18.78	13.83	77.6
5	0	11	74.5
6	22	11	82.1
7	11	7	61.9
8	11	15	69.9
9	11	11	91.5
10	11	11	90.9
11	11	11	91.8
12	11	11	91.3
13	11	11	91.4
14	11	11	91.0
15	11	11	91.7
16	11	11	91.8

表 5 方差分析

Tab. 5 Variance analysis

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 812.82	5	362.56	2 367.19	<0.000 1**
θ	65.48	1	65.48	427.54	<0.000 1**
$\Delta\theta$	71.12	1	71.12	464.38	<0.000 1**
$\theta\Delta\theta$	0.28	1	1.51	1.83	0.205 5
θ^2	345.18	1	345.18	2 312.44	<0.000 1**
$\Delta^2\theta$	1 321.75	1	1 321.75	8 629.74	<0.000 1**
残差	1.53	10	0.15		
总和	1 814.35	15			

注：**表示极显著($P < 0.01$)。下同。

3.3.3 试验结果优化

为寻求约束条件下各因素的最佳组合,以扣袋犁扣袋效果最优为目标,犁面偏转角 θ 和元线角差值 $\Delta\theta$ 为变量,建立参数优化模型。目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max r(\theta, \Delta\theta) \\ 91.7\% \leq r \leq 100\% \\ 3.22^\circ \leq \theta \leq 18.78^\circ \\ 8.17^\circ \leq \Delta\theta \leq 13.83^\circ \end{cases} \quad (17)$$

将数据代入求解得到较优参数组合:犁面偏转角 θ 为 12.65° 、元线角差值 $\Delta\theta$ 为 11.32° 时,此参数组合下扣袋效果为 91.90% 。结合实际加工条件,在表层土壤埋覆率为 $91.7\% \sim 91.90\%$ 之间选取犁面最优参数组合,得到偏转角 θ 为 12° 、元线角差值 $\Delta\theta$ 为 11° 。

4 田间试验

4.1 试验工况与设备

田间试验所选田块均留有水稻高茬秸秆,土壤

偏黏重,且常年采用稻-油轮作模式种植,采用全喂入式联合收获机粉碎后的秸秆全量还田形成浮草呈条状平铺于地表上,浮草长度为 $90 \sim 110 \text{ mm}$,立茬高度为 $500 \sim 700 \text{ mm}$,田间工况参数如表 6 所示。

表 6 试验工况参数

Tab. 6 Test conditions parameters

工况	土壤			秸秆		
	含水 率/ $\%$	坚实度/ kPa	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	留茬高 度/ mm	秸秆量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	含水率/ $\%$
1	32.9	1 279.8	1.13	564	3.3	34.6
2	27.5	1 864.2	1.27	682	3.9	26.5
3	37.8	928.4	0.96	513	3.5	38.8

试验配套动力为东方红-LX954 型拖拉机,试验器材包括: BK-5 型拉压力传感器、土壤坚实度仪、直尺和土壤取样环刀等。

4.2 试验方法

4.2.1 扣袋犁与平行扣袋组作业性能试验

为了验证扣袋犁的窜袋、扣袋效果和并行扣袋犁组作业性能,获取扣袋犁的最优作业参数,于 2022 年 10—12 月在湖北省荆州市监利县华中农业大学稻油轮作全程机械化生产示范基地开展田间试验,土壤秸秆参数如表 6 中工况 1 和工况 2 所示。

为获取扣袋犁较优作业参数组合,在土壤工况 1 稻茬地中开展了作业速度、作业深度对作业阻力和扣袋效果影响的二因素三水平正交试验,试验因素水平如表 7 所示。已知窜袋型犁体作业速度在 $3.96 \sim 7.2 \text{ km/h}$ 时有良好耕作质量^[20],查阅《东方红拖拉机使用保养说明书》选取东方红 954 型拖拉机低 III 挡(4.15 km/h)、低 IV 挡(6.68 km/h)和中 I 挡(5.15 km/h)作业速度作为试验水平。扣袋犁田间试验通过平行扣袋犁装置进行,其主要结构包括平行扣袋犁组、机架、限深轮、切茬圆盘组、三点悬挂装置。试验时,调整好拖拉机挡位,并通过控制手油门来保持作业速度稳定,同时调整限深轮和犁尖之间的高度来控制作业深度,选取作业路径中间稳定 40 m 长的区域进行数据测量,每组试验重复 3 次。

表 7 试验因素水平

Tab. 7 Experimental factors and levels

水平	因素	
	作业深度 h/mm	作业速度 $V/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$
1	210	4.15
2	230	5.15
3	250	6.68

试验以扣袋率和平均牵引阻力作为扣袋犁作业性能评价指标,选取耕后土袋翻转角大于 90° 的土袋为扣袋,参考 GB/T 14225—2008《铧式犁》犁体扣

堡率计算公式为

$$r_0 = \frac{l_1}{l_0} \times 100\% \quad (18)$$

式中 r_0 ——扣堡率, %

l_1 ——扣堡总体长度, mm

l_0 ——测量区域长度, mm

运用 BK-5 型拉压力传感器, 测量扣堡犁作业时牵引阻力; 测量翻扣后土堡中间点与犁壁间的宽度, 取平均值作为土堡运移距离。

为验证平行扣堡犁组作业性能, 利用平行扣堡犁装置在工况 2 稻茬地中开展了平行扣堡犁田间试验。参考 GB/T 14225—2008《铧式犁》中的试验方法, 通过调节限深轮高度和拖拉机手油门大小, 控制平行扣堡犁装置作业深度和速度稳定为扣堡犁最优作业参数, 测量稳定作业区域扣堡犁耕深、耕宽、耕深稳定性系数、耕宽稳定性系数和秸秆埋覆率。

平行扣堡犁组作业后秸秆埋覆率参考树丛法进行测定, 运用一个单位面积的正方形框, 随机多次框选耕前和耕后地表, 收集框内所有秸秆和浮草并称量, 分别取平均值作为耕前和耕后地表秸秆质量。秸秆埋覆率计算公式为

$$r_1 = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (19)$$

式中 r_1 ——秸秆埋覆率, %

m_0 ——耕前地表秸秆质量, kg

m_1 ——耕后地表秸秆质量, kg

4.2.2 整机田间验证试验设计

为验证平行犁组翻扣与旋耕组合式油菜种床制备装置的作业性能, 于 2023 年 10 月在华中农业大学现代农业科学试验基地稻茬地中开展了田间验证试验, 土壤秸秆参数如表 6 中工况 3 所示。参考 GB/T 5668—2017《旋耕机》和 NY/T 2709—2015《油菜播种机作业质量》中的试验方法, 通过调节拖拉机控制手柄使拖拉机作业速度和犁耕深度与扣堡犁最优作业参数相同, 旋耕刀辊转速为 240 r/min, 旋耕深度为 150 mm, 机组沿直线作业, 取中间 40 m 作为稳定测量区, 对整机作业质量进行测量, 每组试验重复 3 次。试验指标为整机耕深、埋茬率、碎土率、厢面平整度, 取所有测量数据的平均值作为最后评价指标。

取普通旋耕机和本文设计犁旋组合式油菜直播机进行对比试验, 比较同一工况下整机田间试验效果, 控制作业速度、旋耕刀辊转速和旋耕深度一致, 试验方法同上。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 扣堡犁与平行扣堡装置作业性能试验

扣堡犁田间作业性能试验效果如图 14 所示, 结

果如表 8 所示, 方差分析如表 9 所示。根据方差分析可得, h 和 V 对扣堡率、牵引阻力、土堡运移距离均有极显著影响。当 V 一定时, h 越大扣堡犁牵引阻力越大, 扣堡率先增大后减小, 土堡侧向运移距离越小; 当 h 一定时, V 越大犁体扣堡效果越好, 但牵引阻力也随之增加, 且土堡侧向运移距离越远; 在满足扣堡埋茬要求下, 为了获取扣堡犁较高的扣堡率和较低牵引阻力, 选择 h 为 230 mm, V 为 5.15 km/h, 作为扣堡犁最优运行参数组合, 此时扣堡率为 91.3%, 牵引阻力为 7.9 kN, 土堡侧向运移平均距离为 458.8 mm。



图 14 扣堡犁田间试验效果

Fig. 14 Field test results of buckling plough

表 8 扣堡犁田间试验方案与结果

Tab. 8 Design and results of experiments

试验 序号	试验因素		扣堡率/ %	牵引阻力/ kN	土堡运移 距离/mm
	h /mm	V /($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)			
1	210	4.15	82.7	5.2	458.7
2	210	5.15	85.6	6.8	469.2
3	210	6.68	86.3	8.1	483.6
4	230	4.15	87.7	6.6	448.7
5	230	5.15	91.3	7.9	458.8
6	230	6.68	93.5	9.4	473.3
7	250	4.15	84.9	7.6	440.9
8	250	5.15	88.4	9.3	451.3
9	250	6.68	90.8	10.8	469.1

表 9 扣堡犁田间试验方差分析

Tab. 9 Variance analysis

指标	来源	平方和	自由度	均方	F	P
扣堡率	h	15.04	1	15.04	94.94	0.002 3 **
	V	39.01	1	39.01	246.27	0.000 6 **
	残差	41.46	6	6.91		
	总和	95.51	8			
牵引 阻力	h	9.63	1	9.63	653.89	0.000 1 **
	V	13.2	1	13.2	896.76	<0.000 1 **
	残差	0.07	6	0.01		
	总和	22.90	8			
土堡运 移距离	h	420.01	1	420.01	511.8	0.000 2 **
	V	1 006.21	1	1 006.21	1 226.12	<0.000 1 **
	残差	25.85	6	4.31		
	总和	1 452.07	8			

平行扣堡犁组在高茬秸秆地中有较好的作业性

能,试验效果如图 15 所示,试验结果如表 10 所示。扣袋犁平均耕宽为 394.5 ~ 412.6 mm,平均耕宽稳定性系数达到 85.8%,满足横向 400 mm 犁耕埋茬作业;扣袋犁有着良好的窜袋和扣袋效果,作业后高茬秸秆平均埋覆率达到 82.5%,平均耕深达到 218.6 mm,耕深稳定性系数达到 90.2%,满足油菜合理种床构建的犁耕需求。



图 15 平行扣袋犁组田间试验效果

Fig. 15 Field test results of parallel buckling plough group

表 10 工况 2 田间性能试验结果

Tab. 10 Performance test results for working condition 2

试验序号	平均耕宽/mm	耕宽稳定性系数/%	平均耕深/mm	耕深稳定性系数/%	秸秆埋覆率/%
1	403.3	89.4	228.9	93.4	84.7
2	412.6	85.8	236.7	92.1	85.3
3	394.5	88.7	218.6	90.2	82.5

4.3.2 整机田间性能试验与对比试验

平行犁组翻扣与旋耕组合式油菜种床制备装置田间作业效果如图 16 所示。根据试验结果可知,整机平均耕深为 229.7 mm,秸秆埋覆率均高于 87.5%,碎土率为 89.7%,厢面平整度为 31.8 mm,厢面质量满足油菜直播种床耕整要求。试验结果表明,平行扣袋犁装置能够有效翻埋田块中的高茬秸秆和浮草,且能与旋耕装置配合实现对翻埋后的秸秆与土壤混合并均匀输送,最终形成 200 mm 以上厚度的松碎土层,符合油菜“深翻埋茬,上松下紧”种床合理耕层构建要求。



图 16 整机田间试验效果

Fig. 16 Field test results of whole machine

田间对比试验结果表明:在有高茬秸秆和浮草的工况下作业时,普通旋耕机耕层深度较浅,无法充分实现土壤对秸秆和浮草的埋覆,种床制备质量受影响较大;平行犁组翻扣与旋耕组合式油菜种床制备装置能够通过平行扣袋犁组对地表秸秆和浮草进行切割并使其深埋于地下,再通过旋耕刀辊将翻扣后的土块及漏耕区秸秆进行破碎和混合,种床制备质量高于普通旋耕机,平均耕深增大 90.9 mm,秸秆埋覆率和碎土率分别提高 7.2 个百分点和 6.5 个百分点。

5 结论

(1)为解决油菜直播机采用普通旋耕时常导致种床耕深浅、秸秆埋覆率低,采用现有犁旋一体机时转弯半径过大的问题,设计了一种平行扣袋机构,可实现土块向左侧翻扣,并集成了犁组翻扣与旋耕组合式油菜犁种床制备装置,一次作业可实现前茬秸秆深埋、开畦沟、旋耕碎土和种床平整等工序。

(2)采用直纹面法建立了扣袋犁犁体曲面的解析参数方程,确定了圆弧形导向曲线半径为 300 mm、犁铧安装角度为 45°、犁铧宽度为 424 mm;确定了平行扣袋组中圆盘犁刀半径为 270 mm、扣袋犁安装间距为 500 mm;确定了旋耕装置左右两刀辊中旋耕刀为 II T245 型右弯刀、数量为 34 把、初始位置角度差为 6°。

(3)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 软件开展了二次正交旋转试验,分析了机具扣袋性能,确定了偏转角 θ 与元线角差值 $\Delta\theta$ 分别为 12°、11°。

(4)田间试验表明:当耕深为 230 mm、作业速度为 5.15 km/h 时,扣袋犁平均扣袋率为 91.3%,有较好的埋茬效果;平行扣袋犁组在高茬水稻秸秆工况下有良好的通过性,秸秆平均埋覆率高于 82.5%,平均耕深大于 218.6 mm,耕深稳定性系数高于 90.2%;平行犁组翻扣与旋耕组合式油菜种床制备装置平均耕深达 229.7 mm,秸秆埋覆率高于 87.5%,碎土率为 89.7%,厢面平整度为 31.8 mm,相比于普通旋耕机,平均耕深增大 90.9 mm,秸秆埋覆率和碎土率分别提高 7.2 个百分点和 6.5 个百分点,作业质量满足油菜播种要求,符合油菜“深翻埋茬,上松下紧”种床合理耕层构建要求。

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] 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 and development of rapeseed planting and land preparation technology and equipment[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 702-711. (in Chinese)

- [3] 王磊,边祺旺,廖庆喜,等. 高茬黏重稻茬田油菜直播埋茬防堵深施肥复合装置研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 83-94.
WANG Lei, BIAN Qiwang, LIAO Qingxi, et al. Burying stubble and anti-blocking deep fertilization composite device for rapeseed direct planting in high stubble and heavy soil rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 83-94. (in Chinese)
- [4] 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 deep fertilization device for rapeseed precision combined direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 65-75. (in Chinese)
- [5] 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 mulching device for rapeseed precision combined direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 52-62. (in Chinese)
- [6] 洪筠,崔占荣,任露泉. 仿生犁与普通犁作业综合经济效益的对比分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 93-96.
HONG Yun, CUI Zhanrong, REN Luquan. Comparative analysis of the comprehensive economic benefits of bionic plough and ordinary plough operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 93-96. (in Chinese)
- [7] 余贵珍,吴成武,丁能根,等. 犁体参数化设计系统的研究[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 49-51, 36.
YU Guizhen, WU Chengwu, DING Nenggen, et al. Research on the parametric design system of plough body[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 49-51, 36. (in Chinese)
- [8] 翟力欣,姬长英,丁启朔,等. 犁面前部土体表层位移场分布有限元分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 45-50.
ZHAI Lixin, JI Changying, DING Qishuo, et al. Finite element analysis of the displacement field distribution of the surface layer of the soil in front of the plough[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 45-50. (in Chinese)
- [9] FANIGLIULO R, POCHI D, SERVADIO P. Conventional and conservation seedbed preparation systems for wheat planting in silty-clay soil[J]. Sustainability, 2021, 13(11): 6506.
- [10] 秦宽,丁为民,方志超,等. 犁翻旋耕复式作业耕整机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 7-16.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Design and test of plough turning rotary tillage duplex operation cultivator[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 7-16. (in Chinese)
- [11] 张银平,杜瑞成,刁培松,等. 正反转组合式水稻宽苗带灭茬播种机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 7-13.
ZHANG Yinping, DU Ruicheng, DIAO Peisong, et al. Design and test of forward and reverse combined rice wide seedling zone stubble seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 7-13. (in Chinese)
- [12] 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 test of driven disc plough opposing combined cultivator in rice-oil rotation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 33-41. (in Chinese)
- [13] 廖庆喜,卜祥利,孙文成,等. 构建油菜种床合理耕层的驱动型犁旋联合耕整机研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 74-84.
LIAO Qingxi, BU Xiangli, SUN Wencheng, et al. Research on drive-driven plough-rotary combined tillage machine for constructing reasonable tillage layer of rapeseed bed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 74-84. (in Chinese)
- [14] 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, 2021, 40(2): 67-76.
SUN Wencheng, LIAO Qingxi, ZHANG Qingsong, et al. Design and test of driven plough turning and reverse rotary tillage combined rapeseed bed finishing machine[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 67-76. (in Chinese)
- [15] 孙妮娜,王晓燕. 秸秆粉碎还田与整地复式作业机连接装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 15-24, 87.
SUN Ni'na, WANG Xiaoyan. Design and experiment of connection device of duplex straw crushing returning and soil preparation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 15-24, 87. (in Chinese)
- [16] 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. Research on tillage and finishing combined operation technology and supporting machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(5): 40-43. (in Chinese)
- [17] 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): 52-55.
JIA Honglei, MA Chenglin, LIU Feng, et al. Straw and stubble crushing and returning to the field combined operation process and supporting equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 52-55. (in Chinese)
- [18] 黄宣国. 空间解析几何与微分几何[M]. 上海:复旦大学出版社, 2003.

- [19] 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 plough-spin combined rice stubble full amount returning rape seed bed finishing machine[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(6):139-146. (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.
- [21] DB42/T 1312—2017 稻茬地油菜直播机械化耕整地技术规程[S]. 2017.
- [22] 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 test of plough-spin combined rape seeding machine buckle device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):38-46. (in Chinese)
- [23] 魏国梁,张青松,王彪,等. 油菜直播机扣袋犁体参数分析与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2022,52(7):1709-1718.
WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, WANG Biao, et al. Analysis and test of plough body parameters of rapeseed direct seeding machine[J]. Journal of Jilin University(Engineering Science),2022,52(7):1709-1718. (in Chinese)
- [24] 龚振平,马春梅,闫超,等. 耕作学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2018.
- [25] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- [26] 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):190-200,208.
ZHANG Wenliang, DU Jun, ZHANG Jumin, et al. Design and test of plough-spin straw returning combined operation machine [J]. Journal of Gansu Agricultural University,2020,55(2):190-200,208. (in Chinese)
- [27] 刘晓鹏,肖文立,马磊,等. 油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J]. 农业机械学报,2017,48(11):79-87.
LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, MA Lei, et al. Design and quality test of combined ship-type ditcher for rapeseed combined direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(11):79-87. (in Chinese)
- [28] 侯守印,纪张驰,薛东辉,等. 适配免耕播种单体的清秸装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(7):111-122.
HOU Shouyin, JI Zhangchi, XUE Donghui, et al. Improved design and test of straw cleaning device adapted to no-tillage seeding monomer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(7):111-122. (in Chinese)
- [29] DU J, HENG Y, ZHANG K, et al. Investigation of the burial and mixing performance of a rotary tiller using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220:105349.
- [30] 廖庆喜,林建新,张青松,等. 适宜油菜直播的铲锹式种床整备机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,53(10):26-35.
LIAO Qingxi, LIN Jianxin, ZHANG Qingsong, et al. Design and test of shovel seed bed preparation machine suitable for rape direct seeding[J]. Transactions for the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,53(10):26-35. (in Chinese)
- [31] 廖庆喜,谢昊明,张青松,等. 驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(7):99-110,195.
LIAO Qingxi, XIE Haoming, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):99-110,195. (in Chinese)
- [32] 周华,李栋,刘政源,等. 秸秆旋理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)
- [33] 祝英豪,夏俊芳,曾荣,等. 基于离散元的稻板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. Research on power consumption prediction model of rotary tillage in paddy field based on discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(10):42-50. (in Chinese)