doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.019

稻茬田油菜直播秸秆覆盖还田装置设计与试验

张青松[1,2]　齐　涛[1]　燕　桓[1]　廖庆喜[1,2]　杜文斌[1]　蔡家顺[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油菜直播作业时,地表留存的水稻秸秆质量大,直播机触土部件进行秸秆混埋、深埋等作业时,存在秸秆全量还田难度大、机具易堵塞等问题,设计了一种稻茬田油菜直播秸秆覆盖还田装置,该装置可与油菜直播机配合作业,完成秸秆后铺覆盖还田、开畦沟、灭茬旋耕碎土、施肥播种等作业工序,实现部分秸秆厢面覆盖还田,可以通过液压系统控制装置作业参数调节部分秸秆混埋还田作业效果和厢面覆盖秸秆质量。秸秆覆盖还田装置主要由拨秸部件、割秸部件、提秸部件、输秸部件和液压系统等组成,通过动力学与运动学分析,确定秸秆覆盖还田装置关键部件结构及运行参数。开展田间试验,试验结果表明,油菜直播秸秆覆盖还田装置各工作部件作业正常,机组作业通过顺畅,当秸秆覆盖输入量为 1.9 ~ 2.7 kg/s 时,机具作业后厢面秸秆覆盖作业均匀性好,当输入秸秆量达 2.7 kg/s 时,秸秆覆盖作业均匀性系数可达 90.8%,研究结果为稻茬田油菜直播秸秆覆盖还田装置设计提供参考。

关键词: 油菜直播; 秸秆覆盖还田装置; 稻茬田; 田间试验
中图分类号: S222.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0186-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Rape Direct Seeding Straw Mulching Returning Device in Rice Stubble Field

ZHANG Qingsong[1,2]　QI Tao[1]　YAN Huan[1]　LIAO Qingxi[1,2]　DU Wenbin[1]　CAI Jiashun[1]
(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: In the rice-rapeseed rape rotation area of mid-lower Yangtze River, due to the heavy soil in this area, the amount of straw floating on the surface is large, and it is difficult to carry out the operation of straw mixed burial and deep burial by the direct seeding machine, and the machine is easy to block. A straw mulching and returning device was designed. The device can cooperate with the rape direct seeding machine to complete the operation procedures of straw returning, furrowing, stubble rotary tillage, soil crushing, fertilization and sowing, and realize partial straw cover returning. The operation parameters of the hydraulic system control device can be used to adjust the operation effect of partial straw mixed burial returning and the quality of straw covered on the box. The straw mulching and returning device was mainly composed of straw parts, straw cutting parts, straw lifting parts, straw conveying parts and hydraulic system. Through dynamic and kinematic analysis, the structure and operation parameters of the key components of the straw mulching and returning device were determined. In order to verify the operation effect of the device, a field experiment was carried out. The results showed that the working parts of the rape direct seeding straw mulching and returning device worked normally, and the unit operation passed smoothly. When the input amount of straw mulching was 1.9 ~ 2.7 kg/s, the uniformity of straw mulching on the box surface after the operation of the machine was good. When the amount of input straw reached 2.7 kg/s, the uniformity of straw mulching can reach 90.8%. The relevant research provided a reference for the design of straw mulching and returning device for direct seeding rape in rice stubble field.

Key words: rape direct seeding; straw mulching returning device; rice stubble field; field experiment

收稿日期: 2024 - 08 - 19　修回日期: 2024 - 09 - 15
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000401)、国家自然科学基金项目(32001427)和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)
作者简介: 张青松(1987—),男,副教授,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: qszhang@mail.hzau.edu.cn

0　引言

油菜是我国重要的油料作物[1-2]，长江流域是我国冬油菜主产区，面积和产量均占全国的 85%以上，主要采用稻油水旱轮作的种植模式[3-4]。前茬水稻收获后，采用油菜精量联合直播机，一次完成开畦沟、灭茬旋耕碎土、施肥播种等种植工序[5]，具有轻简高效、节本增产等优势。由于长江流域稻油轮作区土壤黏重板结，水稻收获后，地表留存的水稻秸秆浮草量大，油菜直播种床整备作业时，直播机触土部件进行秸秆混埋、深埋等作业，存在秸秆全量还田难度大、机具易堵塞等问题[6-7]，因此，长江中下游稻油轮作区油菜直播作业时，前茬水稻秸秆浮草处理成为油菜直播亟待解决的问题。

目前国内外针对秸秆处理主要分为离田和还田两种作业方式，离田处理是将作物秸秆收集打捆后运离田块，可作为饲料、食用菌生产基料、造纸原料等[8]。还田处理是将作物秸秆留在田里，主要有混埋还田、深埋或者沟埋还田、覆盖还田等方式。秸秆还田处理不仅能使土壤中生物活性及养分含量增加，而且还可改良土壤理化特性[9-11]，同时秸秆覆盖还田可缓解气温骤变对土壤温度的影响，蓄水保墒还能在稻油轮作系统中提高土壤肥力，增加作物产量[12-13]。相关学者对不同的秸秆还田方式进行了研究，秦宽等[14]针对免耕播种机堵塞等问题，设计了一种秸秆粉碎全量还田的秸秆还田施肥点播机。罗伟文等[15]设计了一种全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机，该机能一次性完成碎秸清秸、行间覆秸、种带施肥旋耕、播种镇压等工序。廖庆喜等[16]针对旋耕装置秸秆埋覆率低、刀辊易缠草等问题，设计了一种驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机，实现秸秆深埋还田。顾峰玮等[17]基于“洁区播种”思路设计了一种麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机，实现洁区施肥播种、播后均匀覆秸等作业。综上所述，相关研究学者设计了不同的秸秆还田机具，可以实现秸秆混埋、深埋、沟埋以及厢面覆盖等还田作业，但针对长江中下游稻油轮作区，油菜直播作业时实现水稻秸秆覆盖还田研究少见报道。

针对长江中下游稻油轮作区油菜直播作业时，地表留存的水稻秸秆质量大，存在秸秆全量还田难度大，机具易堵塞等问题，本文设计一种稻茬田油菜直播秸秆覆盖还田装置，与油菜直播机配合作业，以实现部分秸秆厢面覆盖还田，部分秸秆混埋还田。

1　总体结构与工作原理

1.1　总体结构组成

油菜直播机主要包括旋耕装置、排种系统、施肥系统、开畦沟系统、秸秆覆盖还田装置、三点悬挂装置及机架，其中秸秆覆盖还田装置包括拨秸部件、割秸部件、提秸部件、输秸部件和液压系统。拨秸部件、割秸部件和提秸部件位于旋耕装置前方，输秸部件位于旋耕装置上方，施肥系统位于直播机机架上方，排种系统位于输秸部件后方，其中拨秸部件、割秸部件和提秸部件通过回转轴铰接固定在机架上，可通过控制液压系统液压缸伸缩，使得拨秸部件、割秸部件和提秸部件整体绕机架转动，调节秸秆覆盖还田装置作业参数，实现厢面覆盖秸秆质量调节。为保证秸秆输送能力，提秸部件和输秸部件输送带上均安装有交错分布的直立小导条和平行分布的直立大导条。为尽量使秸秆覆盖还田装置作业铺放厢面的秸秆分布于非播种条带区域，避免播种条带水稻秸秆覆盖量过大影响出苗，提秸部件输送带和输秸部输送带均安装有隔断板，实现秸秆向非播种条带区域输送。油菜直播机整体结构和主要技术参数如图 1 和表 1 所示。

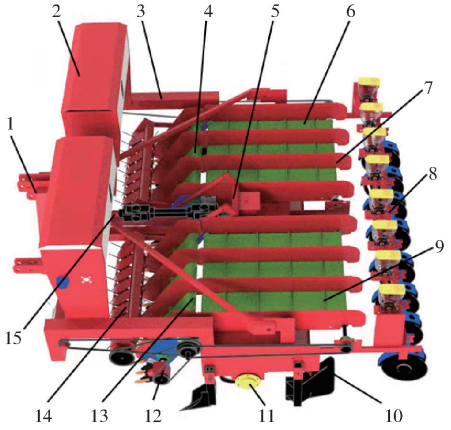


图 1　油菜直播机结构示意图

Fig. 1　Structure diagram of rape direct seeding straw back laying device

1. 三点悬挂装置　2. 排肥系统　3. 机架　4. 提秸部件　5. 液压系统　6. 输秸部件　7. 隔断板　8. 排种系统　9. 直立大导条　10. 开畦沟系统　11. 旋耕装置　12. 割秸部件　13. 直立小导条　14. 拨秸部件　15. 油菜直播机前置十字形齿轮箱

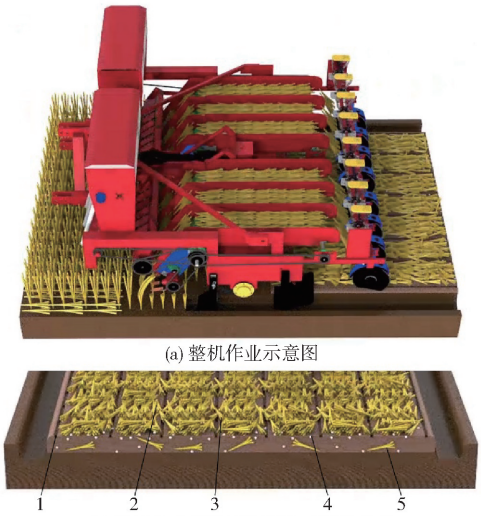
表 1　技术参数

Tab. 1　Technical parameters

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 800×2 500×1 500
配套动力/kW	70
作业幅宽/mm	2 500
作业速度/(km·h^{-1})	2.0～3.5

1.2 工作原理

油菜直播机在留有大量高茬水稻秸秆地表作业时,在拖拉机牵引下往前运动,布置于油菜直播机两侧的开畦沟系统作业出排水畦沟,安装于秸秆覆盖还田装置前方的施肥系统将颗粒肥料施于未耕地表,秸秆覆盖还田装置实现地表秸秆收集、向后输送及覆盖于播种后厢面地表,旋耕装置实现地表土壤细碎和秸秆混埋,排种系统按照油菜种植农艺要求,将油菜种子播到旋耕装置作业后的厢面地表预定深度,机具作业原理如图 2 所示。



(a) 整机作业示意图

(b) 机具作业后种床秸秆种子肥料分布

图 2 油菜直播秸秆覆盖还田装置作业原理

Fig. 2 Working principle of rape direct seeding straw mulching returning device

1. 油菜种子 2. 非播种条带区域的覆盖秸秆 3. 播种条带区域的覆盖秸秆 4. 肥料颗粒 5. 已旋耕区土壤层内混埋的稻茬秸秆

油菜直播机秸秆覆盖还田装置是实现秸秆覆盖还田的关键装置,机具作业时,按照设计要求,秸秆覆盖还田装置收集旋耕装置作业前地表的一定量秸秆并向后输送,铺放于旋耕作业后且已经播种的厢面地表。秸秆覆盖还田装置作业时,拨秸部件拨动地表留存的高茬水稻秸秆进入提秸部件作业区,其中地表留存的浮草进入提秸部件作业区后,直接向后提升输送,进入输秸部件作业区;而地表留存的高茬直立水稻秸秆入提秸部件作业区后,需经割秸部件切断后,由提秸部件向后提升输送,进入输秸部件作业区;输秸部件将进入输送带上的所有秸秆向非播种条带区域输送,铺放于旋耕作业后且已经播种的厢面地表,完成整个装置作业。

1.3 传动组成

油菜直播机作业时,三点悬挂装置与拖拉机三点悬挂连接,拖拉机动力输出轴 PTO 通过万向节驱动油菜直播机前置十字形齿轮箱。前置十字形齿轮箱后输出轴通过万向节连接旋耕装置中央齿轮箱输入轴。前置十字形齿轮箱两侧通过万向节及链传动驱动提秸部件驱动轴旋转,拨秸部件驱动轴和输秸部件驱动轴通过链传动连接提秸部件驱动轴,割秸部件曲柄摇杆机构中的曲柄连接提秸部件驱动轴;通过提秸部件驱动轴回转运动,实现拨秸部件、提秸部件和输秸部件回转运动及割秸部件往复运动。油菜直播秸秆覆盖还田装置各部件传动系统如图 3 所示。

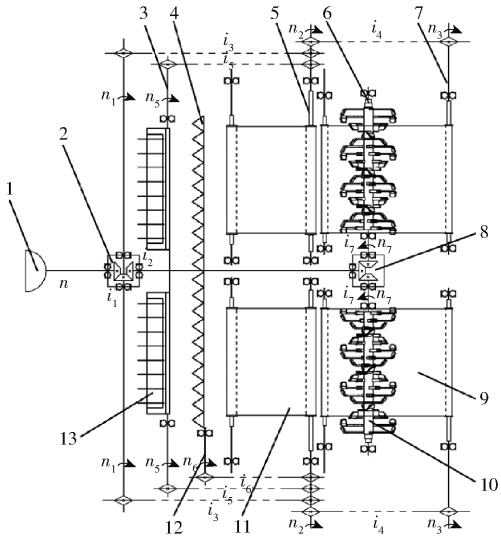


图 3 油菜直播秸秆覆盖还田装置传动系统示意图

Fig. 3 Schematic of transmission system of rape direct seeding straw mulching returning device

1. 拖拉机动力输出轴 PTO 2. 油菜直播机前置十字形齿轮箱 3. 拨秸部件驱动轴 4. 割秸部件 5. 提秸部件驱动轴 6. 旋耕装置驱动轴 7. 输秸部件驱动轴 8. 旋耕装置中央齿轮箱 9. 输秸部件 10. 旋耕装置 11. 提秸部件 12. 割秸部件曲柄摇杆机构 13. 拨秸部件

2 关键部件设计

2.1 拨秸部件

拨秸部件主要由弹齿、曲柄、凸轮滑道、拨秸部件罩壳等组成,是一个转动后的摆动从动件盘形凸轮机构。弹齿在随中心轴匀速转动的同时,随机具匀速前进,并且受到凸轮滑道内壁的控制,相对于滚筒摆动。如图 4 所示,弹齿在凸轮滑道内可以完成拨秸、收齿、放齿、空转 4 个阶段动作。

如图 5 所示,半径为 R 的圆形内部虚线为弹齿安装端随滚筒转动轨迹,封闭曲线外部虚线为弹齿末端运动轨迹,由圆弧段 AB、EA,过渡曲线段 BE 组成的封闭曲线为拨秸部件曲柄导向轨道中心线轨迹。将弹齿运动过程中的姿态变化所对应的滚筒转动关系定义为拨秸弹齿相位角[18]。

拨秸阶段(轨道中心线 AC 段、弹齿运动相位角 θ_1):弹齿初始与秸秆垂直,弹齿端部开始向下拨动秸秆,并随着滚筒转动将秸秆向后拨动,曲柄运动至

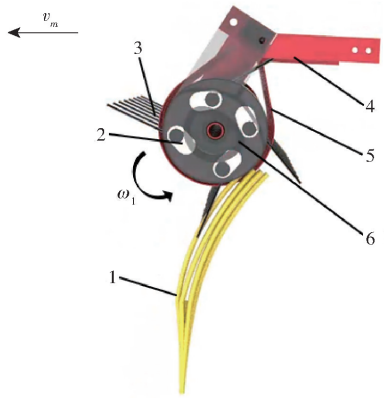


图 4　拨秸部件作业示意图

Fig. 4　Operation schematic of straw parts

1. 水稻秸秆　2. 曲柄　3. 弹齿　4. 拨秸部件罩壳　5. 拨秸部件护板　6. 凸轮滑道

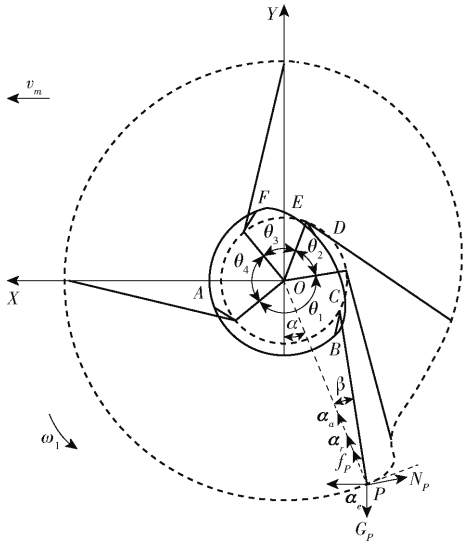


图 5　拨秸部件秸秆运动分析

Fig. 5　Analysis of straw movement of straw parts

点 C 时，弹齿即将从秸秆中抽离，确定拨秸阶段弹齿运动相位角 θ_1 为 150°。

收齿阶段（轨道中心线 CD 段、弹齿运动相位角 θ_2）：曲柄在点 C 时，弹齿大幅度收齿，并随着滚筒转动，弹齿端部速度迅速减小，方向向上，逐渐收缩到护板内侧，当曲柄运动到点 D 时，弹齿收缩到最短，确定收齿阶段弹齿运动相位角 θ_2 为 60°。

放齿阶段（轨道中心线 DF 段、弹齿运动相位角 θ_3）：弹齿向上运动，速度迅速增大，弹齿逐渐从护板之间的空隙伸出，曲柄运动到点 F 时，弹齿趋近于横向，伸张到最长，确定放齿阶段弹齿运动相位角 θ_3 为 60°。

空转阶段（轨道中心线 FA 段、弹齿运动相位角 θ_4）：弹齿向下运动，曲线 FA 为圆弧，运动平稳，曲柄在点 A 时，弹齿与秸秆接触并向下打压，确定空转阶段弹齿运动相位角 θ_4 为 90°。

根据机具作业幅宽选定拨秸部件幅宽为 950 mm，弹齿杆上弹齿间距为 63 ~ 100 mm，弹齿排数为 3 ~ 5 排[19-21]，拨秸部件主要用于后拨水稻秸秆，水稻种植株距为 100 ~ 130 mm，地表留存水稻秸秆长度为 450 ~ 650 mm，故弹齿间距取 115 mm，疏齿型弹齿排数选择 4，弹齿长度为 160 mm。

拨秸部件作业时，水稻秸秆在弹齿作用下拨送至割秸部件作业区域，而拨秸部件运动参数对于秸秆拨送作业有着重要影响，因此需对弹齿拨秸与收齿临界点处进行分析。

由弹齿运动过程中的姿态以及摆动分析得出弹齿拨送秸秆的动作应在 AC 段进行，曲柄在轨道中心线 AC 段滑动，此时弹齿杆跟随滚筒绕中心轴匀速转动且不发生相对运动。因此将匀速转动的拨秸部件轴心视为动参考系，将匀速前进的机组视为定参考系。将水稻秸秆与弹齿接触作用点 P 设为弹齿将秸秆拨送出的瞬时位置，如图 5 所示。

根据加速度合成定理，有

$$\begin{cases} \boldsymbol{a}_a = \boldsymbol{a}_c + \boldsymbol{a}_r + \boldsymbol{a}_e \\ a_c = a_e = 0 \\ a_a = a_r = \omega_1^2 R_1 \end{cases} \tag{1}$$

式中　a_a——绝对加速度，m/s^2

a_c——科氏加速度，m/s^2

a_e——牵连加速度，m/s^2

a_r——相对加速度，m/s^2

R_1——水稻秸秆质心 P 到拨秸部件轴心 O 转动半径，m

ω_1——拨秸部件滚筒角速度，rad/s

在 PO 方向质点运动微分方程投影为

$$m_P a_a = N_P \sin\beta + G_P \cos\alpha - f_P \cos\beta \tag{2}$$

其中

$$\begin{cases} G_P = m_P g \\ N_P = m_P g \sin\alpha \\ f_P = \mu N_P = \mu m_P g \sin\alpha \end{cases} \tag{3}$$

式中　N_P——质点 P 所受弹齿支持力，N

G_P——质点 P 所受重力，N

f_P——质点 P 所受摩擦力，N

μ——水稻秸秆与弹齿杆表面摩擦因数

g——重力加速度，取 9.8 m/s^2

α——OP 与 Y 轴夹角，(°)

β——OP 与弹齿杆夹角，(°)

m_P——质点质量，kg

弹齿能将秸秆向后拨送，与割秸部件配合完成秸秆切割条件为

$$m_P \frac{v_P^2}{R_1} \geqslant N_P \sin\beta + G_P \cos\alpha - f_P \cos\beta \tag{4}$$

其中

$$v_P = \omega_1 R_1$$

$$\omega_1 = \frac{\pi n_5}{30}$$

$$n_5 \geqslant \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{g(\sin\alpha\sin\beta + \cos\alpha - \mu\sin\alpha\cos\beta)}{R_1}} \quad (5)$$

式中 n_5——拨秸部件中心轴转速,r/min

v_P——质点 P 线速度,m/s

其中,摩擦因数 μ 取 0.3[22],OP 与弹齿杆夹角 β 为 13°,OP 与 Y 轴夹角 α 随滚筒转动逐渐增大,在图 5 质点 P 所处拨送出临界位置时,将各参数代入式(5)可得拨秸部件中心轴转速 $n_5 \geqslant 99.18$ r/min。

秸秆拨送至后方时应具有一定初速度[23],结合齿轮箱传动比,最终确定拨秸部件中心轴转速 n_5 为 110 r/min。

2.2 割秸部件

2.2.1 割秸部件运动参数

如图 6 所示,割秸部件由动刀片、护刃器和直角齿轮箱等组成,其主要作用是将拨秸部件拨入的秸秆切断。考虑到割秸部件的作业对象是水稻收获后韧性较大的高留茬水稻茎秆,且作业幅宽较大,因此采用往复式割秸部件,切割形式选用Ⅲ型[24],即动刀片与护刃器配合作业对水稻茎秆进行切割,割秸部件传动采用曲柄连杆传动以实现往复运动,其中动刀片运动位移和运动速度分析如图 7 所示。

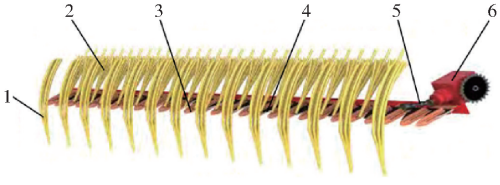


图 6 割秸部件结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of straw cutting parts

1. 待切割秸秆 2. 已被切断的秸秆 3. 护刃器 4. 动刀片 5. 鱼眼接头 6. 直角齿轮箱

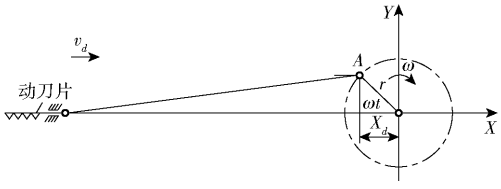


图 7 曲柄连杆机构传动动刀片运动分析示意图

Fig. 7 Diagram of motion analysis of transmission moving blade of crank connecting rod mechanism

对动刀片进行运动分析,其位移 X_d、速度 v_d 计算式为

$$\begin{cases} X_d = r(1 - \cos(\omega t)) \\ v_d = \omega t\sin(\omega t) \end{cases} \quad (6)$$

式中 r——曲柄半径,m

ω——曲柄角速度,rad/s

t——动刀片运动时间,s

由式(6)可知动刀片运动近似简谐运动。切割速度越大,越容易切断秸秆,但过大的切割速度也会产生较大的惯性力,容易造成零部件损坏和部件振动[25]。当其他条件相同时,动刀片负荷与整机前进速度 v_m 成正比,即

$$\begin{cases} v_d = \beta_g v_m \\ n_g = \dfrac{30 v_d}{\pi r} \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\beta_g = \frac{v_d}{v_m} \quad (8)$$

式中 β_g——切割比

n_g——曲柄转速,r/min

当动刀片平均运动速度大于 0.3 m/s 时,可顺利完成茎秆切割,但速度过大也会引起较大振动,导致切割不稳[26]。在刀片尺寸一定时,空白区和重割区的大小由机具前进速度及动刀片速度决定,选定合适的刀速与行走速度比例可以提高切割质量并减少功耗。因此,综合以上因素选取切割比 β_g 为 1.2,确定曲柄转速 n_g 为 233 r/min,切割频率为 3.88 Hz。

2.2.2 动刀片滑切角

割秸部件对茎秆进行切割时,当秸秆未被稳定夹持,秸秆会沿动刀片滑移,导致漏割或割茬不整齐[27],为减少上述现象,需要对动刀片滑切角进行分析。

当秸秆刚接触动刀片未被夹持时,秸秆主要受到动刀片和护刃器对秸秆的摩擦合力 F_1、前进时推力 F_t 以及根部对秸秆拉力 F_2,受力过程如图 8a 所示。当前进推力竖直分力与根部拉力和不小于摩擦合力时,秸秆就能避免发生滑移现象,从而避免漏割。因此不发生漏割条件为

$$F_t\sin\beta_1 + F_2 \geqslant F_1 \quad (9)$$

式中 β_1——动刀片与水平面夹角,(°)

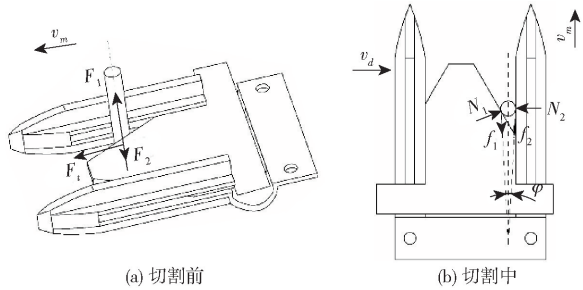


图 8 切割过程受力分析

Fig. 8 Force analysis of cutting process

秸秆切割时,秸秆主要受动刀片对秸秆的支持力 N_1、护刃器对秸秆的支持力 N_2、动刀片对秸秆摩擦力 f_1 及护刃器对秸秆摩擦力 f_2 作用。秸秆切割过程如图 8b 所示,可得

$$\begin{cases} N_1\sin\varphi \leqslant (f_1+f_2)\cos\varphi \\ N_1\cos\varphi = N_2 \\ f_1 = \mu_1 N_1 = \tan\beta_2 N_1 \\ f_2 = \mu_1 N_2\cos\varphi = \tan\beta_2 N_2\cos\varphi \end{cases} \tag{10}$$

式中　φ——动刀片滑切角，(°)

μ_1——水稻秸秆与动刀片摩擦因数

β_2——水稻秸秆与动刀片摩擦角，(°)

经计算，满足秸秆不沿动刀片滑移条件为

$$\varphi \leqslant \beta_2 \tag{11}$$

即滑切角需小于等于动刀片与秸秆之间的摩擦角。动刀片与秸秆之间的摩擦因数一般不超过 0.6[28]，对应摩擦角为 30.96°，滑切角应小于该值，结合现有切割动刀片类型，最终确定动刀片滑切角 φ 为 23°。

2.3　提秸和输秸部件

2.3.1　提秸部件

提秸部件结构示意图如图 9 所示，其主要功能为将切割的秸秆提升运送到输秸部件上方。提秸部件采用带式倾斜输送装置，主要包括提秸部件驱动轴、提秸部件从动轴、提秸部件输送带、分隔板、直立小导条等。为了增强输送带对秸秆的抓取运送能力，有若干小导条错列排布在提秸部件输送带上。工作时，由油菜直播机前置十字形齿轮箱给提秸部件驱动轴提供动力，从而带动提秸部件输送带和提秸部件从动轴运动，完成秸秆提升后运作业。

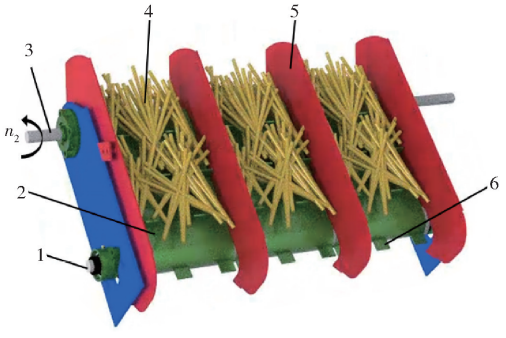


图 9　提秸部件结构示意图

Fig. 9　Schematic of straw lifting conveying parts

1. 提秸部件从动轴　2. 提秸部件输送带　3. 提秸部件驱动轴
4. 待输送的水稻秸秆　5. 分隔板　6. 小导条

提秸部件输送带选用 PVC 材质，根据油菜种植行距农艺要求，结合直播机旋耕装置结构尺寸，设计单个输送带周长为 5 460 mm，宽度为 280 mm。提秸部件输送带驱动轴用于带动提秸部件输送带传动并承担输送部件的载荷，因此提秸部件驱动轴半径应尽量取大，考虑秸秆输送的空间约束，确定提秸部件转轴半径 r_t 为 38 mm。

秸秆提升输送过程中，对秸秆提升运动有主要影响的有提秸部件输送带的倾斜角度以及转速，因此对秸秆提升运动进行分析(图 10)，为使秸秆能够顺利提升输送，需要满足

$$\begin{cases} \mu_2 mg\cos\theta - mg\sin\theta \geqslant 0 \\ v_t = 2n_2\pi r_t \\ v_t \geqslant v_m \end{cases} \tag{12}$$

式中　v_t——提秸部件输送带线速度，m/s

μ_2——水稻秸秆与输送带表面摩擦因数

n_2——提秸部件输送带转速，r/min

θ——倾斜角，(°)

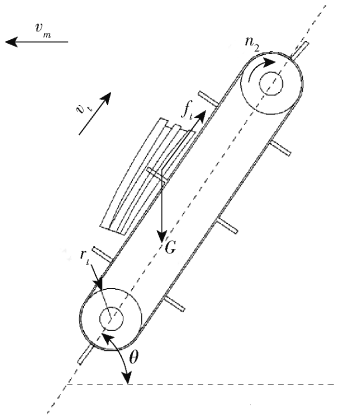


图 10　秸秆提升运动分析示意图

Fig. 10　Diagram of analysis of straw lifting movement

提秸部件输送带与水平面夹角应满足

$$\tan\theta \leqslant \mu_2 \tag{13}$$

提秸部件输送带线速度应满足

$$n_t \geqslant \frac{v_m}{2\pi r_t} \tag{14}$$

根据式(13)、(14)可得，提秸部件输送带与平面夹角最小不得小于 32.6°，确定倾斜角最小为 33°，得出提秸部件驱动轴转速 n_2 不小于 158.4 r/min，提秸部件输送带线速度 v_t 不小于 0.61 m/s。

2.3.2　输秸部件

输秸部件结构示意图如图 11 所示，其主要功能是将秸秆向后运送覆盖到厢面地表。其结构主要包括输秸部件驱动轴、输秸部件从动轴、输秸部件输送带、分隔板等，并且输秸部件输送带等距排布长导条，用于增强输秸部件输送带运送秸秆的能力。工作时，由提秸部件驱动轴给输秸部件驱动轴提供动力，进而带动输秸部件输送带和输秸部件从动轴运动，完成秸秆向后输送，实现秸秆覆盖还田作业。

输秸部件输送带选用 PVC 材质，结合提秸部件与直播机旋耕装置结构尺寸，设计单个输送带周长为 10 530 mm，宽度为 280 mm。输秸部件驱动轴用于给输秸部件输送带传动，为了让提秸部件作业时

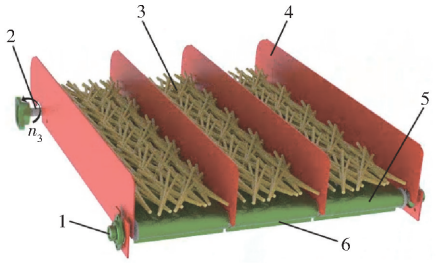


图 11 输秸部件结构示意图

Fig. 11 Schematic of straw back laying conveying parts

1. 输秸部件从动轴 2. 输秸部件驱动轴 3. 待输送的水稻秸秆 4. 分隔板 5. 输秸部件输送带 6. 长导条

提升的秸秆能运送到输秸部件输送带上,提秸部件输送带最高点与输秸部件输送带上端竖直距离尽量取大,即在满足载荷情况下输秸部件驱动轴半径应尽量取小,确定输秸部件转轴半径 r_h 为 25 mm。

秸秆经由提秸部件输送带抛运至输秸部件输送带上,运动过程如图 12 所示,只需要输秸部件输送带输送速度不小于提秸部件输送带输送速度即可稳定后输,即

$$\begin{cases} v_h \geqslant v_t \\ v_h = 2n_3 \pi r_h \end{cases} \tag{15}$$

式中 v_h——输送带线速度,m/s

n_3——输送带转速,r/min

由式(15)可得输秸部件驱动轴转速 n_3 不小于 210 r/min,输秸部件输送带线速度 v_h 不小于 0.79 m/s。

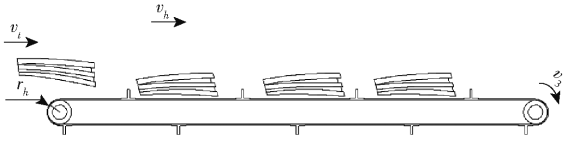


图 12 秸秆后输运动分析示意图

Fig. 12 Diagram of analysis of straw back transport movement

2.3.3 秸秆输送运动

如图 13 所示,秸秆被切割后,由秸秆输送部件完成秸秆提升、后铺功能。输送环节是完成秸秆覆盖还田作业的关键,因此需对提秸部件和输秸部件进行参数匹配设计与分析。

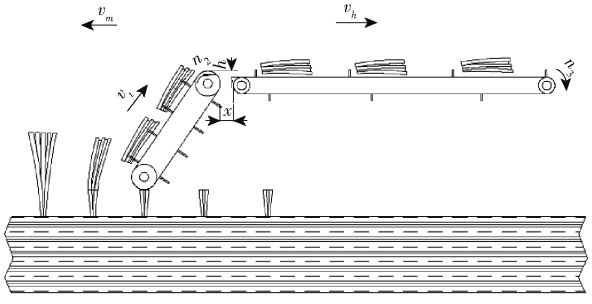


图 13 秸秆输送运动分析示意图

Fig. 13 Diagram of analysis of straw conveying motion

秸秆提升阶段,秸秆运动为随提秸部件输送带倾斜向上运动和机具前进运动的复合运动,提秸部件输送带需将切割的秸秆及时提升并抛送到输秸部件输送带上,需满足

$$\begin{cases} (v_t - v_m) t_1 \geqslant x \\ \dfrac{1}{2} g t_1^2 \leqslant h \end{cases} \tag{16}$$

其中

$$v_t \geqslant x \sqrt{\frac{g}{2h}} + v_m \tag{17}$$

式中 t_1——秸秆运动时间,s

h——提秸部件输送带最高点与输秸部件输送带上端竖直距离,m

x——提秸部件输送带最高点与输秸部件输送带前端水平距离,m

由于机具前进速度为 2 ~ 3.5 km/h,结合式(14)、(17),最终确定提秸部件驱动轴转速 n_2 为 231.4 r/min,提秸部件输送带线速度 v_t 为 0.87 m/s。

秸秆后铺阶段,输秸部件输送带线速度不应小于提秸部件输送带的线速度,同时考虑到秸秆输送量会变化[29-30],因此输秸部件输送带线速度应适当增大,即

$$\gamma = \frac{v_h}{v_t} \tag{18}$$

式中 γ——输送比,取 1.52

结合式(15)、(18),最终确定输秸部件驱动轴转速 n_3 为 347.1 r/min,输秸部件输送带线速度 v_h 为 0.91 m/s。

2.4 液压系统

液压系统用于将拨秸部件、割秸部件、提秸部件同步提升,使其绕提秸部件驱动轴作定轴转动,调节秸秆覆盖还田装置作业参数,实现厢面覆盖秸秆质量调节。因此对割送部件提升极限位置进行分析,确定液压缸行程,如图 14 所示。设液压缸行程为 s,参考液压缸设计准则[31],根据各设定值和两极限位置几何关系可得

$$\begin{cases} (h_1 + h_y)^2 = l_1^2 + H^2 - 2 l_1 H \cos\left(\alpha_1 + \dfrac{\pi}{2}\right) \\ (h_2 + h_y)^2 = l_1 + H^2 \\ s = h_1 - h_2 \end{cases} \tag{19}$$

式中 h_1——液压拉杆最短长度,mm

h_2——液压拉杆最长长度,mm

h_y——液压缸长度,mm

H——液压缸最高点距机具水平面高度,mm

l_1——割送部件重心到旋转中心距离,mm

α_1——割送部件处最低时割送部件与水平面夹角,(°)

根据整机结构布局,割送部件处最低时割送部

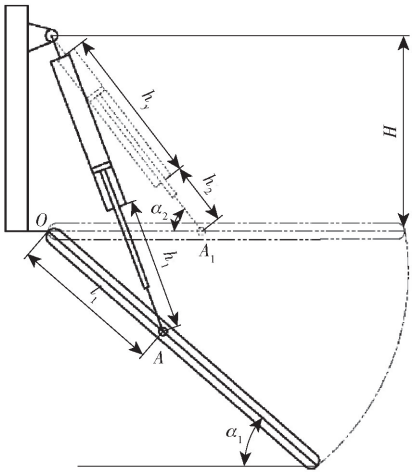


图 14　液压系统运动过程示意图

Fig. 14　Motion process diagram of hydraulic system

件与水平面夹角 α_1 为 33°，割送部件处最高时液压缸与水平面夹角 α_2 为 55°，结合液压缸标准缸型行程对结果优化取整，确定液压缸行程 s 为 300 mm。

液压缸实际工作时主要使拨秸部件、割秸部件和提秸部件转动，根据各部件结构参数及位置关系，计算可得作业时液压缸实际承受最大负载为 1 238.2 N。初定液压缸工作压力 p_y 为 1.6 MPa。为防止提升过程中压力突变造成机具大幅振动，回油路安装背压阀，参考液压与气压传动中液压缸参考背压，选定背压 p_b 为 8×10^5 Pa。

根据文献[32]可知液压缸内径 D_y 计算式为

$$D_y = 1\,000\sqrt{\frac{4F_{\max}}{\pi p_t}} \tag{20}$$

其中

$$p_t = p_y - \frac{1}{2}p_b \tag{21}$$

式中　D_y——液压缸缸筒内径，mm

$F_{\max}$——最大负载，N

p_t——液压缸工作压力，Pa

代入数据可得，D_y 为 36.27 mm，根据活塞杆受力状态，当 $p_t<5$ MPa，此时活塞杆直径 $d=(0.5\sim0.55)D_y$，即 d 为 18.13 ~ 19.95 mm，结合现有液压缸型号，确定液压缸筒内径 D_y 为 40 mm，活塞杆直径 d 为 20 mm。根据设计所得参数对液压缸所能承受的负载 F_e 进行计算，计算式为

$$F_e = \frac{\pi D_y^2}{4}\left(p_y - \frac{1}{2}p_b\right) \tag{22}$$

可得 F_e 为 1 507.2 N，是实际液压缸承受最大负载（1 239.2 N）的 1.2 倍，满足液压装置提升作业需求。

3　田间试验

为验证油菜直播秸秆覆盖还田装置作业效果及整机工作均匀性，于 2023 年 11 月在湖北省荆门市屈家岭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，如图 15 所示，此试验田块常年为稻油轮作模式，试验地表为全喂入联合收获机作业后稻茬田，秸秆平均留茬高度为 550 mm，地表留存秸秆量为 1.9 kg/m^2，秸秆含水率为 22.73%，土壤为粘性土壤。试验机具为油菜直播秸秆覆盖还田装置，动力提供装置选用东方红 954 型轮式拖拉机。



图 15　田间试验作业前地表工况

Fig. 15　Ground surface conditions before field test operation

3.1　测试指标

试验方法和测试指标参照行业标准 JB/T 5160—2010《牧草捡拾器》、国家标准 GB 10395.20—2010《捡拾打捆机》、农业行业标准 NY/T 500—2002《秸秆还田机作业质量》以及国家标准 GB/T 24675.6—2009《保护性耕作机械 秸秆粉碎还田机》进行，选取试验测试指标为机组作业通过性（以秸秆输送率表征）和秸秆覆盖作业均匀性系数。

3.1.1　机组作业通过性

以机组作业通过性为试验指标，在试验地表选取 3 个长为 20 m、宽为 2.5 m 的测试区域，根据地表水稻秸秆留存平均质量，计算可得每个测试区域内秸秆总质量平均值为 95 kg。试验时拖拉机设置为慢 2 挡，速度为 0.75 m/s，并将割秸部件置于最低位置，使其尽可能割断及往后输送更多试验地表留存的水稻秸秆。记录机具作业时发生堵塞情况并收集割断往后输送秸秆总质量，计算秸秆输送率，计算式为

$$S_j = \frac{W_1}{W}\times100\% \tag{23}$$

式中　S_j——秸秆输送率，%

W——测试区域秸秆总质量，kg

W_1——输送秸秆质量，kg

3.1.2　秸秆覆盖作业均匀性系数

稻茬田秸秆韧性强且易簇团，机具作业时秸秆易缠绕堵塞各部件，为测试秸秆覆盖还田装置秸秆覆盖作业均匀性，设置拖拉机挡位为慢 2 挡，并通过调节液压系统控制割秸部件作业位置控制秸秆覆盖输入量，开展秸秆覆盖输入量分别为 1.9、2.3、2.7 kg/s 的性能试验，每个秸秆覆盖输入量开展 4

次试验。目前,由于秸秆覆盖作业均匀性系数尚无专门的相关行业标准,因此参照农业行业标准 NY/T 500—2002《秸秆还田机作业质量》,设计秸秆覆盖作业均匀性系数测试方案为:每个秸秆覆盖输入量水平值的每次试验,选取田块 20 m 长机具作业后的区域,每个测试区域内按行进方向等间距取 0.5 m×0.5 m 的 6 个区域,测量秸秆覆盖质量,秸秆覆盖作业均匀性系数计算式为

$$F_k = \left(1 - \frac{m_{\max} - m_{\min}}{\overline{m}}\right) \times 100\% \tag{24}$$

其中

$$\overline{m} = \frac{m_a}{6} \tag{25}$$

式中 F_k——秸秆覆盖作业均匀性系数,%

m_a——秸秆覆盖总质量,g

$\overline{m}$——秸秆覆盖平均质量,g

$m_{\max}$——秸秆覆盖质量最大值,g

$m_{\min}$——秸秆覆盖质量最小值,g

3.2 试验结果与分析

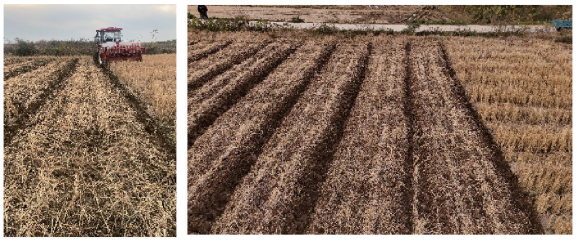
3.2.1 机组作业通过性

由表 2 可知,将割秸部件置于最低位置,使秸秆覆盖还田装置尽可能割断及往后输送更多试验地表留存的水稻秸秆时,各个测试区域内机具作业顺畅,秸秆输送率均值为 92.37%,各关键工作部件未发生堵塞现象,机具作业通过性良好,整机作业效果如图 16 所示。

表 2 机组作业通过性试验结果

Tab. 2 Test results of unit operation pass-ability

试验序号	机组通过性	单个测试区域地表秸秆总质量/kg	秸秆输送(厢面覆盖)质量/kg	旋耕混埋秸秆质量/kg	秸秆输送率/%
1	顺畅	95	86.51	8.49	91.06
2	顺畅	95	89.18	5.82	93.87
3	顺畅	95	87.57	7.43	92.18
平均值			87.75	7.25	92.37



(a) 机具单厢 (b) 机具连续多厢

图 16 机具田间秸秆覆盖作业效果

Fig. 16 Effect of straw mulching in field of machinery

3.2.2 秸秆覆盖作业均匀性系数

由表 3 可知,当秸秆覆盖输入量为 1.9~2.7 kg/s 时,秸秆覆盖作业均匀性系数均值不小于 81.45%,满足秸秆覆盖农艺要求,并且秸秆覆盖输入量逐渐增加后,秸秆覆盖作业均匀性系数也逐步增加。当秸秆覆盖输入量为 1.9 kg/s 时,秸秆覆盖作业均匀性系数均值为 81.45%,主要是因为秸秆覆盖输入量较少,秸秆成簇较小,秸秆团质量轻致使在提秸部件输送带上的摩擦力小,部分秸秆不能及时提升,与后续割送的小秸秆团簇成大团,摩擦力增大,再提升至后方,形成某处覆盖秸秆突然增多且等距出现的情况。秸秆覆盖输入量越大,秸秆一次成团质量越大,便能快速提升,秸秆覆盖作业均匀性系数也会增加。当输入秸秆量达到 2.7 kg/s 时,被切割输送的秸秆可同步簇成大秸秆团提升至后方,秸秆覆盖作业均匀性系数可达 90.8%,秸秆覆盖作业稳定。

表 3 秸秆覆盖作业均匀性试验结果

Tab. 3 Test results of uniformity of straw mulching operation %

秸秆覆盖输入量/(kg·s^{-1})	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	均值
1.9	82.5	85.9	74.8	82.6	81.45
2.3	83.7	83.3	83.5	89.7	85.05
2.7	91.6	85.3	93.9	92.4	90.80

4 结论

(1)设计了一种与现有油菜直播机配套的秸秆覆盖还田装置,主要由拨秸部件、割秸部件、提秸部件、输秸部件和液压系统等组成,该装置与油菜直播机配合作业,可完成秸秆后铺覆盖还田、开畦沟、灭茬旋耕碎土、播种施肥等作业工序,实现部分秸秆厢面覆盖还田,部分秸秆混埋还田且厢面覆盖秸秆质量可通过液压系统控制装置作业参数进行调节功能。

(2)确定了各关键环节工作部件结构参数及运行参数,拨秸部件弹齿间距为 115 mm、排数为 4、长度为 160 mm、中心轴转速为 110 r/min,割秸部件动刀片曲柄转速为 233 r/min,提秸部件输送带转速为 231.4 r/min,输秸部件输送带转速为 347.1 r/min,液压系统压缸行程为 300 mm。

(3)田间试验结果表明,油菜直播秸秆覆盖还田装置各工作部件作业正常,机组作业通过顺畅,当秸秆覆盖输入量为 1.9~2.7 kg/s 时,机具作业秸秆覆盖作业均匀性好,当输入秸秆量达到 2.7 kg/s 时,秸秆覆盖作业均匀性系数可达 90.8%。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 汪波,宋丽君,王宗凯,等. 我国饲料油菜种植及应用技术研究进展[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):695 - 701.
WANG Bo, SONG Lijun, WANG Zongkai, et al. Production and feeding technology of fodder-rapeseed in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5):695 - 701. (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] 万星宇,廖庆喜,廖宜涛,等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报,2021,40(2):24 - 44.
WAN Xingyu, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2):24 - 44. (in Chinese)

[5] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报,2017,48(9):1 - 16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(9):1 - 16. (in Chinese)

[6] 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.

[7] 杜文斌,周国威,张青松,等. 油菜直播组合式埋茬防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(5):60 - 70.
DU Wenbin, ZHOU Guowei, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of the anti-blocking device combined stubble burying for rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(5): 60 - 70. (in Chinese)

[8] 高静,朱捷,黄益国,等. 农作物秸秆还田研究进展[J]. 作物研究,2019,33(6):597 - 602.
GAO Jing, ZHU Jie, HUANG Yiguo, et al. Discussion on the utilization methods of straw[J]. Crop Research, 2019, 33(6): 597 - 602. (in Chinese)

[9] SIDHU H S,MANPREET S,YADVINDER S, et al. Development and evaluation of the turbo happy seeder for sowing wheat into heavy rice residues in NW India[J]. Field Crops Research,2015,184:201 - 212.

[10] 刘晓永,李书田. 中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征[J]. 农业工程学报,2017,33(21):1 - 19.
LIU Xiaoyong, LI Shutian. Temporal and spatial distribution characteristics of crop straw nutrient resources and returning to farmland in China[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(21):1 - 19. (in Chinese)

[11] WATANABE T, MAN H L, VIEN M D, et al. Effects of continuous rice straw compost application on rice yield and soil properties in the Mekong Delta[J]. Soil Science and Plant Nutrition,2009,55(6):754 - 763.

[12] 王昆昆,刘秋霞,朱芸,等. 稻草覆盖还田对直播冬油菜生长及养分积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(6):1047 - 1055.
WANG Kunkun, LIU Qiuxia, ZHU Yun, et al. Effects of straw mulching on growth and nutrients accumulation of direct-sown winter oilseed rape[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(6): 1047 - 1055. (in Chinese)

[13] 苏伟. 稻草还田对油菜生长、土壤肥力的综合效应及其机制研究[D]. 武汉:华中农业大学,2014.
SU Wei. The effects and mechanism of straw retaining on winter oilseed rape growth and soil fertility[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University,2014. (in Chinese)

[14] 秦宽,曹成茂,廖移山,等. 秸秆还田施肥点播机粉碎抛撒装置结构设计与优化[J]. 农业工程学报,2020,36(3):1 - 10.
QIN Kuan, CAO Chengmao, LIAO Yishan, et al. Design and optimization of crushing and throwing device for straw returning to field and fertilizing hill-seeding machine[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(3):1 - 10. (in Chinese)

[15] 罗伟文,顾峰玮,吴峰,等. 全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(12):42 - 52.
LUO Weiwen, GU Fengwei, WU Feng, et al. Design and experiment of wheat planter with straw crushing and inter-furrow collecting mulching under full amount of straw and root stubble cropland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(12):42 - 52. (in Chinese)

[16] 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)

[17] 顾峰玮, 胡志超, 陈有庆,等. 洁区播种思路下麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机研制[J]. 农业工程学报, 2016,

32(20): 15 - 23.
GU Fengwei, HU Zhichao, CHEN Youqing, et al. Development and experiment of peanut no-till planter under full wheat straw mulching based on "clean area planting"[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 15 - 23. (in Chinese)
[18] 许涛,沈永哲,高连兴,等. 基于两段收获的弹齿式花生捡拾机构研究[J]. 农业机械学报,2016,47(3):90 - 97,111.
XU Tao, SHEN Yongzhe, GAO Lianxing, et al. Spring-finger peanut pickup mechanism based on two-stage harvest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(3):90 - 97,111. (in Chinese)
[19] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社,2007.
[20] 陈有庆,胡志超,王申莹,等. 割秧后花生收获机捡拾装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(16):1 - 8.
CHEN Youqing, HU Zhichao, WANG Shenying, et al. Design and experiments of pickup device of peanut harvester after cutting peanut straws[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(16):1 - 8. (in Chinese)
[21] 王文明,王春光. 弹齿滚筒式捡拾装置参数分析与仿真[J]. 农业机械学报,2012,43(10):82 - 89.
WANG Wenming, WANG Chunguang. Parameter analysis and simulation of spring-finger cylinder pickup collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(10):82 - 89. (in Chinese)
[22] 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)
[23] 王申莹,胡志超,徐弘博,等. 全喂入式花生捡拾收获机捡拾输送装置研制[J]. 农业工程学报,2019,35(19):20 - 28.
WANG Shenying, HU Zhichao, XU Hongbo, et al. Design and test of pickup and conveyor device for full-feeding peanut pickup harvester[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(19):20 - 28. (in Chinese)
[24] 韩余,宋志禹,陈巧敏,等. 弧型往复双动式采茶割秸部件优化与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(24):35 - 43.
HAN Yu, SONG Zhiyu, CHEN Qiaomin, et al. Optimization and experiment of arc type reciprocating double-acting tea picking cutter[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(24):35 - 43. (in Chinese)
[25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京:中国农业机械出版社, 2007.
[26] 廖庆喜,王乾祥,万星宇,等. 自走式油菜薹收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):126 - 138.
LIAO Qingxi, WANG Qianxiang, WAN Xingyu, et al. Design and experiment of self-propelled rapeseed stalks harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3):126 - 138. (in Chinese)
[27] 施印炎,陈满,汪小昱,等. 芦蒿有序收获机割秸部件动力学仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(2):110 - 116.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Dynamic simulation and experiments on *Artemisia selengensis* orderly harvester cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):110 - 116. (in Chinese)
[28] 杜哲. 茶茎秆仿生动刀片设计及切割性能研究[D]. 镇江:江苏大学,2020.
DU Zhe. Research on biomimetic design of cutting blade for tea stem and its cutting performance[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2020. (in Chinese)
[29] 万星宇,舒彩霞,廖庆喜,等. 高地隙履带自走式中间条铺油菜割晒机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):109 - 121.
WAN Xingyu, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of self-propelled middle-placement rape windrower with high ground elearance crawler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(9):109 - 121. (in Chinese)
[30] 李平,廖庆喜,李磊,等. 4SY - 1.8 改进型油菜割晒机主要装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(1):53 - 58.
LI Ping, LIAO Qingxi, LI Lei, et al. Design and experiment of the main device of 4SY - 1.8 modified rape windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(1):53 - 58. (in Chinese)
[31] 许福玲. 液压与气压传动[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
[32] 秦大同, 谢里阳. 现代机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2010.