

油菜精量联合直播机覆秸装置设计与试验

廖宜涛^{1,2} 李玥宾¹ 廖庆喜^{1,2} 樊伟¹ 高丽萍¹ 陈慧^{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: 在长江中下游稻油轮作区,前茬水稻机收后秸秆全量留田,当接茬进行油菜精量联合直播作业时,浮秸易缠绕直播机触土部件,造成机具堵塞、种子落在秸秆上难以出苗等问题。为此,结合油菜覆草种植农艺措施,提出适于油菜直播水稻秸秆覆盖还田的机械化作业方案,设计了一种与油菜精量联合直播机配套的覆秸装置。通过理论分析,确定了覆秸装置关键环节工作部件的结构参数、安装位置与安装角及工作转速范围。控制秸秆喂入量分别为0.9、1.1、1.3 kg/s,进行性能测试试验,验证了理论分析确定的各部件工作转速的适宜性和秸秆输送顺畅稳定性,结果表明,当播种覆秸作业机组配套69.9 kW拖拉机、前进速度0.7 m/s、捡拾装置滚筒转速80 r/min、集秸装置螺旋输送机转速270 r/min和链式提升装置转速270 r/min时,机具作业顺畅,秸秆捡拾率达到90%以上。控制均匀铺放装置转速分别为210、240、270、300、330 r/min,当转速为300 r/min时,秸秆覆盖均匀率最高,超过92%。田间试验表明,覆秸直播机秸秆通过性能良好,各环节工作部件作业稳定,各项设计指标均满足技术标准要求,设计的覆秸装置与油菜精量联合直播机集成,一次作业可完成水稻浮秸的捡拾、堆集、输送、覆盖以及旋耕整地、开畦沟、施肥、油菜播种等工序,适宜在水稻机收后秸秆未作任何处理的稻茬田作业。

关键词: 油菜精量联合直播机; 秸秆覆盖还田; 捡拾抛撒

中图分类号: S223.2⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)05-0052-11 OSID: 

Design and Test of Straw Gather – Mulch Device of Combined Precision Rapeseed Seeder

LIAO Yitao^{1,2} LI Yuebin¹ LIAO Qingxi^{1,2} FAN Wei¹ GAO Liping¹ CHEN Hui^{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: In the middle and lower reaches of the Yangtze River, the rice and rapeseed are the most important crops. They are planted in turn, and after the rice is harvested, rapeseed will be planted in time. High-efficiency combined precision seeder is often used to plant the rapeseed, which could complete seedbed preparation, ditching, fertilizing and sowing at once. However, here is a difficulty left by the previous rice harvest that is the harvest machine threshes the grain and leaves the rice straw in the field. The straw is easy to entangle the soil-touching parts of the combined precision seeder to block the machine, as well as the seeds are easy to fall on the straw, and difficult to emerge. Considering the kind of agronomic practice of straws covering for rapeseed cultivation, an innovation mechanized operation scheme both suitable for rapeseed seeding and returning rice straw mulch to the seedbed was proposed. A straw gather – mulch device matching with combined precision rapeseed seeder was designed. Through theoretical analysis, the structural parameters, installation position and angle, and working speed range of the key components of the straw mulching device were determined. Carrying the performance tests, controlling the straw feed rate of 0.9 kg/s, 1.1 kg/s and 1.3 kg/s respectively, the feasibility of the working speed of each component was determined by theoretical analysis and the stability of straw transportation were verified. The experiment showed when the seeding straw mulching operation unit was equipped with a tractor of 69.9 kW, at the operation speed of 0.7 m/s, the roller speed of the pickup

收稿日期: 2020-12-29 修回日期: 2021-02-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975238、32001427)、国家重点研发计划项目(2018YFD0200901)、中国博士后科学基金项目(2020M672371)和国家油菜产业体系专项(CARS-12)

作者简介: 廖宜涛(1982—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: liaotao@mail.hzau.edu.cn

device was 80 r/min, the speed of auger and chain lifting device of straw collecting device was 270 r/min, the planter and components worked steadily, and the straw picking rate could reach 90%. Controlling the speed of the uniform placement device to be 210 r/min, 240 r/min, 270 r/min, 300 r/min and 330 r/min, the experiment showed when the rotational speed was 300 r/min, the uniformity rate of straw covering was over 92%. The field experiment showed that the straw had gathered clearly and mulched appropriately, the working parts of each link were stable, and the design indexes all met the technical requirements. The research showed that the designed straw gather-mulch device was integrated with the combined precision rapeseed seeder, which could complete the rice straw picking, stacking, transporting, rotating tillage, furrow opening, fertilizing, rapeseed seeding and mulching of rice straw in one operation, and it was suitable for the operation of rice stubble field without any treatment of straw after harvest.

Key words: combined precision rapeseed seeder; straw mulching; gather and throw

0 引言

油菜是我国重要的油料作物,兼具饲料、绿肥、食用菜薹、观花旅游等多用途发展潜力^[1-2]。在我国长江中下游地区,油菜种植模式一般为稻油轮作。在前茬水稻收获后,接茬油菜种植采用精量联合直播方式,一次性完成油菜种植所有工序^[3-4],从而实现油菜轻简化栽培,具有轻简高效、节本增效等显著优势,近年来得到广泛推广应用。在长期研究与生产实践中发现,随着水稻产量的逐年增加,水稻收获后秸秆残留量大,且稻茬田土壤黏重板结,在秸秆禁烧的背景下,联合直播作业机具易出现触土工作部件缠绕壅堵、种子落在秸秆上难以出苗等问题^[5]。稻茬田油菜直播时对前茬秸秆处理成为亟待解决的问题。

目前,对秸秆处理有离田和还田两种方式。离田处理采用捡拾打捆机械将农作物收获后的秸秆收集、打捆、外运^[6-7];还田处理是将秸秆留田、自然腐解入土,主要包括混埋还田、沟埋还田、留高茬还田和覆盖还田等方式,还田处理可以改良土壤理化特性、增加土壤中养分含量、提高土壤生物活性^[8-10]。

覆盖还田是秸秆还田处理的有效方式,其工艺是作物收获后秸秆直接覆盖在土壤表面,让其自然风化解。覆盖还田不仅能够抑制土壤风蚀、吸收自然降水、降低土壤中水分蒸发速度,从而提高土壤含水率^[11-12],而且秸秆腐烂后可以增加土壤中的有机质含量,提高土壤固氮能力^[13-15]。将秸秆覆盖在播种后的厢面上,可以有效改良土壤结构,在促进作物根系生长发育的同时还能抑制杂草生长,是一种蓄水、保墒、增产的农艺措施^[16-18]。

国内外学者对不同作物种植及前茬秸秆覆盖还田的相关技术装备进行了研究。如国外种植玉米、大豆时通常将秸秆覆盖还田,与少免耕等耕作方式相结合实现保护性耕作,并开发了秸秆残茬处理、浅旋浅耕、少免耕以及深松等作业机具^[19-22]。在国

内,王汉羊等^[23]针对麦茬地大豆种植区研制了2BMFJ-3型麦茬地免耕覆秸大豆精密播种机,顾峰玮等^[24]针对麦茬地花生种植区提出了“洁区播种”思路,并研制了花生免耕播种机,牛琪等^[25]针对玉米秸秆地小麦种植区研制了玉米秸秆后覆盖小麦播种机,施印炎等^[26]针对稻茬地小麦种植区设计了全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置,整机需配备88.3 kW拖拉机来提供动力。

在我国长江中下游稻油轮作区水旱交替轮作模式下,油菜种植作业工序多,水稻秸秆质地柔软难以粉碎,作业环境复杂,复式作业工作难度大,而油菜种植后进行秸秆覆盖会提高土壤含水率、增加养分吸收量,从而达到增产的效果^[27]。本文将油菜种植农艺要求与秸秆覆盖还田工艺相结合,在已推广应用的油菜精量联合直播机基础上,设计与其配套的覆秸装置,通过分析工作原理确定覆秸装置主要结构参数,以实现覆秸功能,并与直播机配合一次性完成秸秆捡拾、堆集、输送以及旋耕灭茬、开畦沟、施肥、播种后覆秸等作业。

1 结构与工作原理

1.1 整机结构

稻茬田油菜覆草直播机主要由配套油菜精量联合直播机的主机架、主变速箱、旋耕整地装置、排肥系统、排种系统、开畦沟犁、平土板等和覆秸装置组成;覆秸装置位于播种机前端,由前变速箱、弹齿滚筒式捡拾装置、螺旋输送装置、链式提升装置和秸秆均匀铺放装置组成。整机结构紧凑,便于拆卸、挂接,其中弹齿滚筒式捡拾装置安装于整机最前端,安装位置上下可调,进而控制捡拾高度,螺旋输送装置位于机具两侧板间,肥箱置于螺旋输送装置正上方,两套链式提升装置对称安装在机具两侧,秸秆均匀铺放装置安装于链式提升装置出仓口处,排种装置位于机具后侧;前变速箱置于主机架前端,旋耕部件位于主变速箱两侧。油菜覆秸直播机结构和主要技

术参数如图 1、表 1 所示。



图 1 油菜覆秸直播机实物图

Fig.1 Physical picture of rapeseed straw direct seeding machine

1. 弹齿滚筒式捡拾装置 2. 机架 3. 前变速箱 4. 排肥系统
5. 排种系统 6. 秸秆均匀铺放装置 7. 链式提升装置 8. 螺旋
- 输送装置 9. 旋耕整地装置 10. 开畦沟犁

表 1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

参数	数值/方式
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 100×1 894×1 500
整机质量/kg	1 100
挂接方式	三点悬挂
工作幅宽/mm	2 000
配套动力/kW	≥67. 8
作业速度/(km·h ⁻¹)	2~4

1.2 工作原理

整机挂接在拖拉机上,动力由拖拉机动力后输出轴通过万向节连接传输至前变速箱,前变速箱将动力分两路,左输出轴通过万向节将动力传输至弹齿捡拾器、螺旋输送装置、链式提升装置及秸秆均匀铺放装置,后输出轴通过万向节将动力传输至主变速箱后将动力传输给旋耕部件。排肥装置和排种装置均采用电机驱动。工作时,机组前进,弹齿捡拾器将秸秆拾起向后抛送至螺旋输送装置,同时对地表进行旋耕整地、开沟,并进行施肥、播种,秸秆经螺旋输送装置推送到两侧排草口后,经链式提升装置提起并运输抛出,最后经秸秆均匀铺放装置均匀地抛撒到地表,覆盖在播种后的厢面上,完成覆秸作业。机具一次性作业,可实现旋耕、灭茬、开沟、施肥、播种、秸秆清理覆盖还田等功能,完成稻茬田油菜种植所有工序。

2 关键环节部件设计

2.1 拾秸集秸环节

秸秆的捡拾、堆集由图 1 中的弹齿滚筒式捡拾装置、螺旋输送装置和捡拾高度调节装置组配完成。

2.1.1 捡拾装置基本参数选择与物料运动过程分析

弹齿滚筒式捡拾装置主要由弹齿、曲柄、凸轮

滑道、弹齿轴、外壳等组成,是一个反转后的摆动从动件盘形凸轮机构^[28]。弹齿在随捡拾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。因此,弹齿在凸轮滑道内可以完成捡拾、举起、卸草、空回 4 个阶段动作^[29]。

如图 2 所示,内部虚线绘制的半径为 R 的圆形为弹齿随滚筒转动轨迹,外部虚线绘制的封闭曲线为弹齿端部运动轨迹,由圆弧段 AB 、 BC 、 CD ,过渡曲线段 DE 、 KA 和直线段 EF 、 FK 组成的封闭曲线为捡拾器导向轨道中心线轨迹。结合当前捡拾器的机构特点及弹齿摆动规律,综合考虑弹齿相对运动和绝对运动方向,确定各相位角,捡拾阶段对应轨道中心线 AB 段,确定弹齿相位角 θ_1 为 90° ,举起阶段对应轨道中心线 BC 段,确定弹齿相位角 θ_2 为 90° ,卸草阶段对应轨道中心线 CF 段,确定弹齿相位角 θ_3 为 110° ,空回阶段对应轨道中心线 FA 段,确定弹齿相位角 θ_4 为 70° ^[30]。

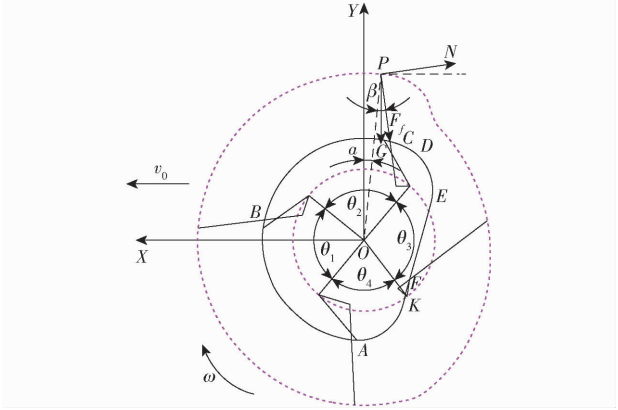


图 2 弹齿捡拾相位及水稻秸秆受力分析

Fig.2 Analysis of picking phase of spring tooth and stress of rice straw

捡拾装置幅宽与机具设计工作幅宽一致,为 2 000 mm,弹齿杆上弹齿间距一般在 63~100 mm 范围内^[31],弹齿排数一般为 3~5 排,本文捡拾装置主要用于捡拾稻茬田秸秆,故弹齿间距选择 65 mm,密齿型,弹齿排数选择 4 排^[32]。

水稻秸秆在经捡拾、举起后需在离心力的作用下才能离开弹齿杆,从而顺利落到螺旋输送装置上,为秸秆堆集创造有利条件。在弹齿举起阶段与卸料阶段临界点进行秸秆运动和受力分析,找到秸秆离开弹齿杆抛向螺旋输送装置的极限条件^[33]。

根据前文对弹齿运动过程中的姿态以及摆动分析,得出弹齿抛送秸秆的动作应在圆弧 CD 段进行,滚轮在轨道中心线 CD 段滑动,此时弹齿杆跟随滚筒绕捡拾中心轴匀速转动且不发生相对摆动。因此可以将匀速转动的捡拾器滚筒轴心视为动参考系,

将匀速前进的机组视为定参考系。将水稻秸秆简化为质点 P ，设为弹齿将水稻秸秆抛出的瞬时位置，其受力分析如图 2 所示。

根据加速度合成定理，有

$$\begin{cases} a_a = a_c + a_r + a_e \\ a_c = a_e = 0 \\ a_a = a_r = \omega^2 R_1 \end{cases} \quad (1)$$

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 到捡拾装置轴心 O 的转动半径， m
 ω ——捡拾滚筒旋转角速度， rad/s

质点运动微分方程在 PO 方向的投影为

$$m' \frac{v^2}{R_1} = G \cos \alpha + F_f \cos \beta - N \sin \beta \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} v = \omega R_1 \\ \omega = \frac{\pi n_1}{30} \\ G = m' g \\ N = m' g \sin \alpha \\ F_f = \mu N = \mu m' g \sin \alpha \end{cases} \quad (3)$$

弹齿杆上抛出水稻秸秆的条件为

$$m' \frac{v^2}{R_1} \geq m' g \cos \alpha + F_f \cos \beta - N \sin \beta \quad (4)$$

$$n_1 \geq \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g(\cos \alpha + \mu \sin \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta)}{R_1}} \quad (5)$$

式中 n_1 ——弹齿捡拾中心轴转速， r/min
 v ——质点 P 线速度， m/s
 N ——质点 P 所受弹齿杆支持力， N
 G ——质点 P 所受重力， N
 F_f ——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， $(^\circ)$
 β —— OP 与弹齿杆夹角， $(^\circ)$
 m' ——质点质量， kg

其中，摩擦因数 μ 为已知量， α 随滚筒转动逐渐增大， β 为定值，图 2 中点 C 为弹齿杆抛送秸秆临界位置，根据前文确定的捡拾装置基本参数及捡拾弹齿相位角，取水稻秸秆与弹齿杆表面摩擦因数 $\mu = 0.3^{[34]}$ ，通过计算可得 $n_1 \geq 66.9 \text{ r/min}$ 。

捡拾器弹齿线速度直接影响捡拾效果，其值一般不小于机具前进速度，且秸秆在被抛出离开弹齿时应具有一定的初速度，结合目前成型弹齿滚筒捡拾

器参数，初步设计弹齿捡拾中心轴转速 $n_1 = 80 \text{ r/min}$ 。

2.1.2 集秸装置基本参数选择与物料运动过程分析

根据捡拾装置安装位置以及整机工作要求，所设计的集秸装置主要由螺旋输送装置等组成，如图 3 所示。弹齿捡拾装置向后抛出的秸秆落入螺旋输送装置，秸秆经两反向螺旋输送叶片推动，由中间向两边排草口输送。

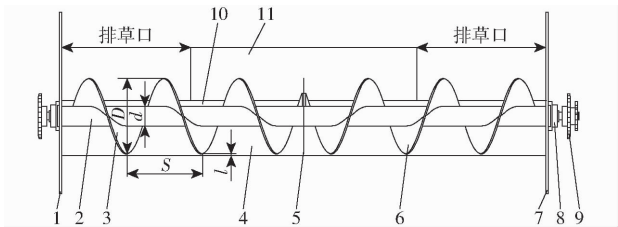


图 3 螺旋输送装置结构简图

Fig. 3 Structure drawing of screw conveyor

1. 左侧板 2. 螺旋输送机轴 3. 左螺旋叶片 4. 输送壳体 5. 分草板 6. 右螺旋叶片 7. 右侧板 8. 轴承 9. 传动链轮 10. 主前梁 11. 挡草板

为保证机具顺畅作业，螺旋输送装置的输送量必须大于秸秆捡拾喂入量。在水稻联合收获机工作后的稻茬田试验地表秸秆量为 0.9 kg/m^2 ，本机具有效捡拾幅宽为 2 m ，机具田间作业速度 0.7 m/s ，经计算，捡拾喂入量 q 为 1.3 kg/s （不考虑漏捡的情况下）。螺旋输送装置的输送量为

$$Q_1 = \frac{\pi}{24} [(D - 2\lambda)^2 - d^2] \psi S n_2 \gamma C \times 10^{-10} \quad (6)$$

式中 Q_1 ——输送量， kg/s
 D ——螺旋输送机叶片外直径， m
 d ——螺旋输送机轴径， m
 S ——螺旋输送机叶片螺距， m
 λ ——螺旋输送机叶片与输送壳体底部间隙， m
 ψ ——填充系数，取 $0.3 \sim 0.4$
 γ ——受压缩的干草体积密度，取 40 kg/m^3
 C ——螺旋输送机倾斜输送系数，水平输送，取 1
 n_2 ——螺旋输送机轴转速， r/min

整理可得

$$Q_1 = 2.1 \times 10^{-10} S n_2 [(D - 2\lambda)^2 - d^2] \geq q \quad (7)$$

$$n_2 \geq \frac{1}{1.9 \times 10^{-10} S [(D - 2\lambda)^2 - d^2]} \quad (8)$$

根据图 4 分析可得，螺旋输送装置升角 α_1 为 $\arcsin(S/(2\pi r))$ ， α_2 为物料与螺旋输送机叶片摩擦角，物料沿 x 轴方向运动的推进速度为 v_x ，与螺旋输送机叶片表面发生相对滑动的圆周速度为 $v_t^{[35]}$ ，计算式为

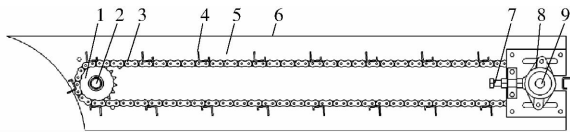


图 6 链式提升装置结构示意图

Fig. 6 Chain lifting device structure diagram

1. 链轮 2. 主动轴 3. 链条 4. U 型耙齿杆 5. 输送仓 6. 仓体 7. 张紧装置 8. 轴承 9. 从动轴

可知,链式提升装置输送量 Q_2 应大于 1.3 kg/s , 即

$$\begin{cases} Q_2 = h_3 b \gamma v_L \geq q \\ n_3 = \frac{60 v_L}{\pi (D_3 + 2 h_4)} \end{cases} \quad (13)$$

则主动轴转速 n_3 为

$$n_3 \geq \frac{60 Q_2}{\pi h_3 b \gamma (D_3 + 2 h_4)} \quad (14)$$

式中 v_L ——主动链轮线速度, m/s

b ——输送仓宽度, m

D_3 ——主动链轮直径, m

h_3 ——耙齿顶与输送仓底板距离, m

h_4 ——耙齿杆高度, m

根据《农业机械设计手册》及本机实际设计需求,确定耙齿杆高度 h_4 为 40 mm ,耙齿顶与输送仓底板距离 h_3 为 20 mm ,主动链轮直径 D_3 为 119 mm ,代入式 (14) 得链式提升装置主动轴转速 $n_3 \geq 263 \text{ r/min}$,取整,确定链式提升装置主动轴转速 n_3 为 270 r/min 。

2.2.2 秸秆均匀铺放装置基本参数选择

秸秆经提升输送后能否在播种作业后的厢面上均匀覆盖非常重要,若油菜种带上出现秸秆堆积现象,不仅不利于保墒保温,而且可能会闷苗,影响后期出苗。因此设计了均匀铺放装置以保证秸秆覆盖还田均匀性。该装置可视为“开放”式螺旋输送机,结构如图 7 所示,螺旋输送机置于机具后方链式提升装置出仓口斜下方,两反向螺旋输送叶片固定在轴上,可将秸秆由两侧向中间推送,遮草板既可以避免秸秆回飞,又可以将两套链式提升装置固定相连,增加机具稳定性,秸秆可在机具前进运动状态下,向后运动并向中间移动,铺放到地表。

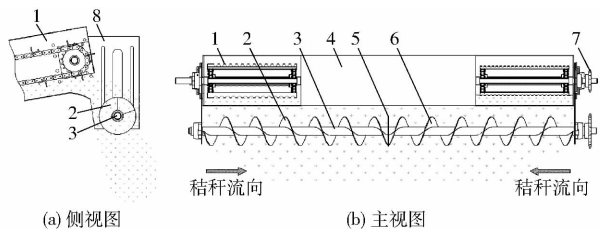


图 7 均匀铺放装置结构示意图

Fig. 7 Structure diagrams of uniform laying device

1. 链式提升装置 2. 左螺旋输送叶片 3. 螺旋输送机轴 4. 遮草板 5. 分草板 6. 右螺旋输送叶片 7. 传动链轮 8. 侧板

如图 8 所示,秸秆在经链式提升装置输送从出仓口抛出时具有一定的初速度 v_1 ,此时少部分秸秆直接撒落到对应出仓口位置的地表,其余部分经螺旋输送机向中间推送,螺旋输送机为“开放”式结构,随着量的积累,秸秆会不断从出草口排出,均匀铺放到播种后的厢面上。

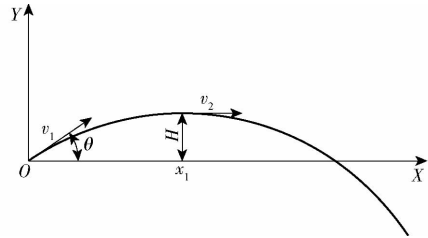


图 8 秸秆抛送轨迹示意图

Fig. 8 Trajectory of straw throwing

考虑空气阻力对抛出秸秆整个运动过程的影响,空气阻力与空气密度、物料运动速度以及形状体积等因素有关,其中在低速情况下,空气阻力与物料速度一次方成正比^[36]。由运动学公式和牛顿第二定律,可得到抛出秸秆斜上抛运动轨迹方程为

$$\begin{cases} m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -k \frac{\partial x}{\partial t} \\ m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -k \frac{\partial y}{\partial t} - mg \\ x|_{t=0} = 0 \\ y|_{t=0} = 0 \\ v_x|_{t=0} = v_1 \cos \theta \\ v_y|_{t=0} = v_1 \sin \theta \end{cases} \quad (15)$$

式中 m ——抛出秸秆质量, kg
 x, y ——秸秆在 t 时刻的轨迹坐标值, m
 t ——秸秆运动时间, s
 k ——空气阻力系数, kg/s
 v_x, v_y ——秸秆在 t 时刻的速度在 X, Y 轴上的投影, m/s
 θ ——抛出秸秆轨迹与水平方向夹角, $(^\circ)$
分离变量,求解方程 (15),得到位移关系方程为

$$\begin{cases} x = \frac{mv_1 \cos \theta}{k} (1 - e^{-\frac{kt}{m}}) \\ y = \left(\frac{mv_1 \sin \theta}{k} + \frac{m^2 g}{k^2} \right) (1 - e^{-\frac{kt}{m}}) - \frac{mg}{k} t \end{cases} \quad (16)$$

秸秆抛出后在 t_1 时刻,水平方向运动位移为 x_1 ,水平方向的运动速度为 v_2 ,竖直位移达到 H ,竖直方向的运动速度 v_y 为 0 ,之后做平抛运动,由运动学公式和牛顿第二定律,可得到抛出秸秆平抛运动轨迹方程为

$$\begin{cases} m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -k \frac{\partial x}{\partial t} \\ m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = mg - k \frac{\partial y}{\partial t} \\ x|_{t=t_1} = x_1 \\ v_x|_{t=t_1} = v_2 \\ y|_{t=t_1} = H \\ v_y|_{t=t_1} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

分离变量,求解方程(17),得到位移关系方程为

$$\begin{cases} x = \frac{mv_2}{k} \left[e^{\frac{k}{m}(t_1-t)} - 1 \right] + x_1 \\ y = \frac{mg}{k} (t - t_1) + \frac{m^2 g}{k^2} \left[e^{\frac{k}{m}(t_1-t)} - 1 \right] + H \end{cases} \quad (18)$$

根据前文对各环节工作部件的分析,求出 v_1 为 2.6 m/s,抛出秸秆轨迹与水平方向夹角即链式提升装置相对机具安装倾角 θ 为 10° ,可得到 t_1 、 v_2 和 H ,代入运动轨迹方程,拟取坐标点 (150 mm, -100 mm),确定均匀铺放装置安装位置。秸秆在螺旋输送装置上水平推送速度应大于相对滑动速度,才会向中间推送抛撒,而转速过快,又会发生秸秆缠绕,因此根据秸秆在此位置的瞬时速度,确定均匀铺放装置轴转速范围为 200 ~ 350 r/min。

2.3 传动系统

稻茬田油菜覆秸直播机采用分路传动系统(图9),即捡拾传动系统、秸秆输送-覆秸传动系统和旋耕整地传动系统。捡拾传动系统由前变速箱、链传动和圆柱齿轮传动组成,动力从拖拉机后输出轴输出,经前变速箱锥齿轮传动减速后,由左输出轴经链传动、圆柱齿轮传动后传递给捡拾器。秸秆输送-覆秸传动系统由前变速箱、链传动以及各关键工

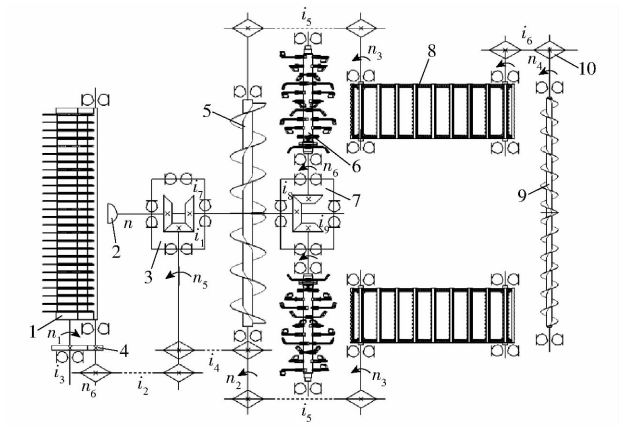


图9 稻茬田油菜覆秸直播机传动系统示意图

Fig.9 Transmission system diagram

1. 弹齿捡拾器 2. 拖拉机动力输出轴 3. 前变速箱 4. 圆柱齿轮传动 5. 螺旋输送装置 6. 旋耕整地装置 7. 主变速箱 8. 链式提升装置 9. 均匀铺放装置 10. 链传动

作部件组成,动力从前变速箱左输出轴经链传动依次传递给螺旋输送装置、链式提升装置和均匀铺放装置。旋耕整地传动系统由前变速箱、主变速箱组成,动力从拖拉机后输出轴输出,经前变速箱后输出轴输出,再经主变速箱锥齿轮传动传递给两侧旋耕系统。

传动比计算公式为

$$\begin{cases} i = i_1 i_2 i_3 = \frac{n}{n_1} \\ i' = i_1 i_4 i_5 i_6 = \frac{n}{n_4} \\ i'' = i_7 i_8 i_9 = \frac{n}{n_6} \end{cases} \quad (19)$$

式中 i ——捡拾传动系统总传动比
 i' ——输送-覆秸传动系统总传动比
 i'' ——旋耕整地传动系统总传动比
 n ——拖拉机动力输出轴转速, r/min
 n_4 ——秸秆均匀铺放装置轴转速, r/min
 n_6 ——捡拾器过渡轴转速, r/min

根据前文分析得, $n_1 = 80$ r/min, $n_2 = 270$ r/min, $n_3 = 270$ r/min, 拖拉机动力输出轴转速 n 取标准值 540 r/min, 综合各关键部件速度要求, 合理分配传动比, $i = 5.386$, $i_1 = 2$, $i_2 = 1.91$, $i_3 = 1.41$, $i_4 = 2.45$, $i_5 = 1$, $i_7 = 1$, $i_8 = 1$, $i_9 = 2$ 。

3 性能试验

3.1 试验方法与测试指标

为验证理论分析确定各环节工作部件转速可行性,开展性能试验。试验方法和测试指标参照机械行业标准 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,主要测试指标:秸秆输送顺畅稳定性(缠草量)、秸秆覆盖均匀率、秸秆捡拾率与机组通过性等,如图10所示。



图10 性能测试试验

Fig.10 Performance test

3.1.1 秸秆输送顺畅稳定性

整机工作部件较多,各传动环节连接紧凑,而稻茬田秸秆呈团状且韧性大,容易使旋转部件发生缠

绕和堵塞现象,为测试覆秸装置秸秆输送顺畅稳定性,设计了台架试验测试缠草量。试验在理论设计所确定的捡拾滚筒转速为 80 r/min、螺旋输送机转速和链式提升装置转速为 270 r/min 工作参数下进行,试验选用东风井关 954 型轮式拖拉机提供动力(69.9 kW),采用人工向集秸装置两侧喂草的方式,控制喂入量分别为 0.9、1.1、1.3 kg/s,喂入时间为 10 s,每组喂入量下的试验连续进行 5 次,连续 5 次试验之间不清理输送装置上缠绕秸秆,相同喂入量试验完成后,清理输送装置上缠绕的秸秆再进行下一组试验。试验时,在均匀覆秸装置下侧水平地面上铺一层 2 m 宽塑料薄膜,每次试验后,将抛撒到塑料薄膜的秸秆称量,计算出缠草量,并观察覆秸装置各工作部件发生堵塞的次数。计算公式为

$$W_0 = W_1 - W_2 \tag{20}$$

式中 W_0 ——缠草量,kg
 W_1 ——喂入秸秆总质量,kg
 W_2 ——抛撒秸秆总质量,kg

3.1.2 秸秆覆盖均匀率

均匀铺放装置可以将链式提升装置抛撒后的秸秆由两侧向中间推送,从而将秸秆铺放到播种后的厢面上,若其转速较低,推送效果会较差,转速过高,容易回带缠草。为了得到均匀铺放装置合理转速,结合前文理论分析确定的转速范围,设计了转速分别为 210、240、270、300、330 r/min 性能试验,每组试验重复 3 次。目前,由于秸秆覆盖均匀性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》,设计了秸秆覆盖均匀性测试方案:试验选用东风井关 954 型轮式拖拉机提供动力,采用人工向集秸装置两侧喂入的方式,控制喂入量为 1.3 kg/s,喂入时间 3 s,则需喂入 3.9 kg,结合 3.1.1 节所测数据,考虑缠草量,确定共喂入 4 kg,每次每侧在 3 s 内平缓喂入 2 kg,在均匀覆入装置下侧水平地面上铺一层 2 m 宽塑料薄膜,等分成宽为 500 mm 的 4 个区域,测量每个区域内的秸秆质量,覆盖均匀率计算公式为

$$F_b = \left(1 - \frac{m_{\max} - m_{\min}}{m} \right) \times 100\% \tag{21}$$

其中 $\overline{m} = \frac{\sum_{i=1}^4 m_i}{4}$

式中 m_i ——第 i 个区域内覆盖质量,kg
 $\overline{m}$ ——4 个区域内覆盖质量平均值,kg
 $m_{\max}$ ——4 个区域内覆盖质量最大值,kg
 $m_{\min}$ ——4 个区域内覆盖质量最小值,kg
 F_b ——秸秆覆盖均匀率, %

3.1.3 秸秆捡拾率与机组通过性

以秸秆捡拾率为试验指标,在联合收获后的稻茬田,先清理散落秸秆,并保留立茬,按秸秆量 0.9 kg/m² 均匀布置 3 个长 10 m、宽 2 m 的测试区域,并将周围秸秆清理干净。机具前进速度为 0.7 m/s,弹齿捡拾装置滚筒转速为 80 r/min。试验前,将均匀铺放装置拆卸,在链式提升装置出仓口处套上帆布袋,收集所有抛出的秸秆称量并记录机具发生堵塞次数。计算秸秆捡拾率,并求 3 个区域的平均值,计算公式为

$$S_j = \frac{W_4}{W_3} \times 100\% \tag{22}$$

式中 S_j ——秸秆捡拾率, %
 W_3 ——测试区域秸秆总质量,kg
 W_4 ——捡拾秸秆质量,kg

3.2 试验结果与分析

3.2.1 秸秆输送顺畅稳定性

由不同喂入量下测定的机具缠草量(图 11)可知,覆秸装置工作部件出现了缠草,缠草部位主要集中在集秸装置螺旋输送机轴两侧排草口处,但随着机具工作时长增加,缠草量稳定在 0.1 kg 左右,并存在随机波动,表明秸秆在工作部件上缠绕累积到一定量后,便趋于稳定状态。在所有试验过程中,只有一次试验在集秸装置两侧排草口处发生了轻微堵塞,各关键环节部件工作稳定,能达到技术要求。

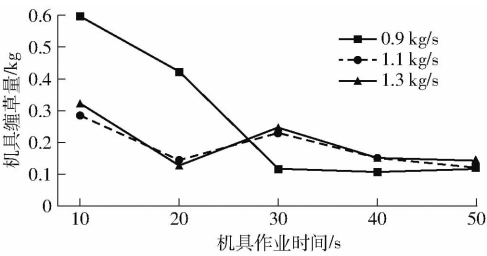


图 11 缠草量试验结果

Fig. 11 Test results of winding straw amount

3.2.2 秸秆覆盖均匀率

由不同转速下测定的均匀铺放装置秸秆覆盖均匀率可知,当螺旋转速小于 300 r/min 时,转速每增加 30 r/min,覆盖均匀率提高 20% ~ 35%,但是均小于 90%,主要是因为铺放装置转速偏低,秸秆未有效推移,大部分被直接抛撒在链式提升装置出口处对应区域;速度越低,两侧区域堆集秸秆越多,速度增大后,运移到中间区域的秸秆量增加,覆盖均匀率提升,当转速为 300 r/min 时,覆盖均匀率最高,超过 92%;当转速进一步增大,达到 330 r/min 时,铺放装置转速过快,秸秆被推送到中间区域较多,导致秸秆不均匀堆集,覆盖均匀率下降(表 2)。

表 2 秸秆覆盖均匀率试验结果

Tab.2 Test results of straw coverage even rate			
转速/ (r·min ⁻¹)	秸秆覆盖均匀率/%		
	试验 1	试验 2	试验 3
210	11.1	15.6	11.2
240	38.2	35.4	38.1
270	65.4	60.8	60.5
300	92.1	93.3	92.2
330	88.5	86.3	87.6

3.2.3 秸秆捡拾率与机组通过性

由表 3 可知,在秸秆量为 0.9 kg/m² 工况下,3 个测试区内秸秆捡拾率均值为 92.8%,且每个测试区内秸秆捡拾率均大于 90%,满足设计要求,符合秸秆捡拾机械标准。机组在田间作业时,各关键环节工作部件未发生堵塞现象,通过性良好。

表 3 秸秆捡拾率试验结果

Tab.3 Test results of straw pickup rate						
试验 序号	机组 通过性	秸秆 总质	左侧秸 秆捡拾	右侧秸 秆捡拾	秸秆 捡拾总	秸秆 捡拾
		量/kg	质量/kg	量/kg	质量/kg	率/%
1	无堵塞	18	8.62	8.14	16.76	93.1
2	无堵塞	18	8.41	7.86	16.27	90.4
3	无堵塞	18	8.85	8.23	17.08	94.9
均值			8.63	8.08	16.70	92.8

4 田间试验

为验证油菜精量联合直播机覆草装置的作业效果及整机工作顺畅稳定性,于 2020 年 10 月在湖北省监利市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,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,试验前未对地表残茬作任何清理,秸秆平均留茬高度为 427 mm,地表秸秆总量为 2.32 kg/m²,地表散落秸秆量为 0.92 kg/m²,秸秆含水率为 59.63%,土壤为偏黏性土。试验机具为油菜覆秸直播机,试验选用东风井关 954 型轮式拖拉机。整机作业效果如图 12 所示。

试验表明,覆秸直播机在田间试验过程中,秸秆

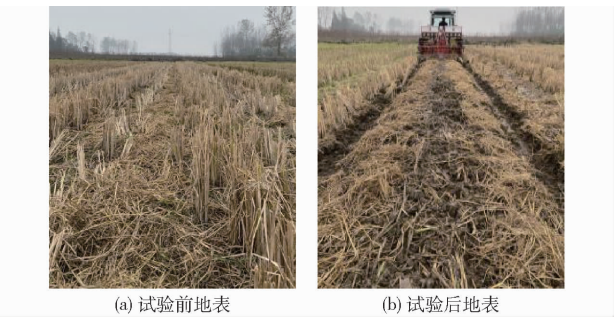


图 12 田间试验作业效果

Fig.12 Field test operation effect

通过性能好,各环节工作部件作业稳定,未发生堵塞现象,各项设计指标基本满足技术要求。但是均匀铺放装置受田间作业环境影响以及作业前田间秸秆分布不均匀,机具作业过程中,在各旋转部件保持一定转速比下,秸秆抛出时间不同,导致覆草均匀性降低,后续需要进一步改进和提高。

5 结论

(1)针对长江中下游稻油轮作区前茬稻田秸秆量大,油菜直播作业时易发生缠绕堵塞的问题,考虑秸秆覆盖还田对作物生长的优势,结合油菜种植农艺要求,设计了一种与已推广应用油菜精量联合直播机配套使用的覆草装置。覆草直播机一次作业可以完成秸秆捡拾、堆集、输送以及旋耕灭茬、开沟、施肥、播种后覆盖等工序,不仅有效利用了秸秆资源,还可实现油菜种植栽培技术轻简化。

(2)通过理论分析确定了关键环节工作部件结构参数、安装位置与安装角以及工作转速范围,在不同喂入量下进行性能测试试验,结果表明,覆秸直播机各工作部件秸秆输送顺畅稳定性较好,理论分析确定的转速可靠,符合作业标准要求;当捡拾滚筒转速为 80 r/min、集秸装置螺旋输送机转速和链式提升装置转速均为 270 r/min 时,机具作业顺畅,秸秆捡拾率达到 90% 以上,符合捡拾机械标准要求;当均匀铺放装置转速为 300 r/min 时,覆盖均匀率最高,超过 92%。

(3)田间试验表明,覆秸直播机整机秸秆通过性能良好,各环节工作部件作业稳定。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 张哲,殷艳,刘芳,等. 我国油菜多功能开发利用现状及发展对策[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):618-623.
ZHANG Zhe, YIN Yan, LIU Fang, et al. Current situation and development countermeasures of Chinese rapeseed multifunctional development and utilization[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 618-623. (in Chinese)

[3] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J/OL]. 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/OL]. Transactions of

- the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1 – 16. http://www.j-csam.org/jc-sam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170901&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)
- [4] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):38–46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200604&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.004. (in Chinese)
- [5] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(2):65–75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002008&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.008. (in Chinese)
- [6] 谢伟,李旭,方志超,等.水稻秸秆收集与连续打捆复式作业机设计[J].农业工程学报,2019,35(11):19–25. XIE Wei, LI Xu, FANG Zhichao, et al. Design of compound machine for rice straw collecting and continuous baling[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 19–25. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 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.
- [9] FLOWER K C, WARD P R, CORDINGLEY N, et al. Rainfall, rotations and residue level affect no-tillage wheat yield and gross margin in a mediterranean-type environment[J]. Field Crops Research, 2017, 208: 1–10.
- [10] 王文博,王晓红.秸秆资源利用及秸秆还田生态环境效益的分析[J].农村经济与科技,2020,31(2):14,26.
- [11] 赵永来,陈智,孙悦超,等.作物残茬覆盖农田地表土壤抗风蚀效应试验[J].农业机械学报,2011,42(6):38–42,37. ZHAO Yonglai, CHEN Zhi, SUN Yuechao, et al. Testing on anti-wind erosion effect of soil for crop stubble coverage farmlands[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 38–42, 37. (in Chinese)
- [12] YANG Haishui, FENG Jinxia, ZHAI Silong, et al. Long-term ditch-buried straw return alters soil water potential, temperature, and microbial communities in a rice-wheat rotation system[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 163: 21–31.
- [13] 刘芳,张长生,陈爱武,等.秸秆还田技术研究及应用进展[J].作物杂志,2012(2):18–23. LIU Fang, ZHANG Changsheng, CHEN Aiwu, et al. Technology research and application prospect of straw returning[J]. Crops, 2012(2): 18–23. (in Chinese)
- [14] WANG Xiaohua, YANG Haisui, LIU Jin, et al. Effects of ditch-buried straw return on soil organic carbon and rice yields in a rice-wheat rotation system[J]. Catena, 2015, 127(4): 56–63.
- [15] DONK S J, MERRILL S D, TANAKA D L, et al. Crop residue in North Dakota: measured and simulated by the wind erosion prediction system[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(5): 1623–1632.
- [16] 苏伟,鲁剑巍,周广生,等.稻草还田对油菜生长、土壤温度及湿度的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(2):366–373. SU Wei, LU Jianwei, ZHOU Guangsheng, et al. Influence of straw-returning on rapeseed (*Brassica napus* L.) growth, soil temperature and moisture[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(2): 366–373. (in Chinese)
- [17] 张丹,付斌,胡万里,等.秸秆还田提高水稻-油菜轮作土壤固氮能力及作物产量[J].农业工程学报,2017,33(9):133–140. ZHANG Dan, FU Bin, HU Wanli, et al. Increasing soil nitrogen fixation capacity and crop yield of rice-rape rotation by straw returning[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(2): 133–140. (in Chinese)
- [18] 赵小蓉,蒲波,李浩,等.秸秆覆盖栽培对油菜土壤含水率和产量的影响[J].西南农业学报,2010,23(2):354–358. ZHAO Xiaorong, PU Bo, LI Hao, et al. Effect of straw covering farming on oilseed rape yield and soil water content under rice-oilseed rape cropping system[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2010, 23(2): 354–358. (in Chinese)
- [19] FALLAHI S, RAOUFAT M H. Row-crop planter attachments in a conservation tillage system: a comparative study[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 98(1): 27–34.
- [20] 李洋阳,刘思宇,单春艳,等.保护性耕作综合效益评价体系构建及实例分析[J].农业工程学报,2015,31(15):48–54. LI Yangyang, LIU Siyu, SHAN Chunyan, et al. Framework for comprehensive benefit assessment on conservation tillage and its application[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 48–54. (in Chinese)
- [21] 何进,李洪文,陈海涛,等.保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL].农业机械学报,2018,49(4):1–19. HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1–19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180401&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)

- [22] 孙先容,熊新洲,牟自军. 油(麦)/大豆-玉米一年三熟免耕秸秆覆盖技术原理研究[J]. 耕作与栽培,1993(6):6-10.
- [23] 王汉羊,陈海涛,纪文义. 麦茬地免耕播种机清秸覆秸装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(增刊2):7-12.
WANG Hanyang, CHEN Haitao, JI Wenyi. Design and experiment of cleaning and covering mechanism for no-till seeder in wheat stubble fields[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp.2):7-12. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):52-59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171107&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.007. (in Chinese)
- [26] 施印炎,罗伟文,胡志超,等. 全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):58-67.
SHI Yinyan, LUO Weiwen, HU Zhichao, et al. Design and test of equipment for straw crushing with strip-laying and seed-belt classification with cleaning under full straw mulching[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):58-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190407&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.007. (in Chinese)
- [27] 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)
- [28] 盛凯,曾南宏. 弹齿滚筒捡拾器的机构特性及其运动数学模型[J]. 农业机械学报,1991,22(1):51-57.
- [29] 王文明,王春光. 弹齿滚筒式捡拾装置参数分析与仿真[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10):82-89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121015&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.015. (in Chinese)
- [30] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3):90-97, 111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160313&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.013. (in Chinese)
- [31] 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.
- [32] 王振华,王德成,刘贵林,等. 方草捆压捆机捡拾器参数设计[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):107-109.
WANG Zhenhua, WANG Decheng, LIU Guilin, et al. Pickup parameters design of square baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.):107-109. (in Chinese)
- [33] 郑智旗,何进,王庆杰,等. 秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):87-96.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, WANG Qingjie, et al. Design and experiment on straw pick-chopping and ditch-burying integrated machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):87-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170711&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.011. (in Chinese)
- [34] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):25-34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190303&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.003. (in Chinese)
- [35] 李海同,廖庆喜,李平,等. 油菜联合收获机分体组合式割台的设计[J]. 华中农业大学学报,2014,33(5):111-116.
LI Haitong, LIAO Qingxi, LI Ping, et al. Design on separating-combined header of rape combine harvester[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(5):111-116. (in Chinese)
- [36] 吴守一,郭永宏. 农业物料空气动力特性的研究[J]. 农业机械学报,1986,17(1):62-72.