

直注式秸秆捡拾粉碎深埋机设计与试验

仝振伟^{1,2} 李洪文^{1,2} 卢彩云^{1,2} 王超^{1,2} 仲广远^{1,2} 林涵^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部河北北部耕地保育农业科学观测试验站, 北京 100083)

摘要: 为提升秸秆深埋质量, 针对秸秆深埋过程中秸秆捡拾效果差、输送方式单一、输送效率低、深埋率低等问题, 提出一种直注式秸秆深埋还田方法, 设计了直注式秸秆捡拾粉碎深埋机, 阐述了整机结构和工作原理。对关键部件进行了设计分析, 设计了无护圈式捡拾装置, 分析了捡拾装置各个运动阶段与弹齿的运动轨迹, 确定了4个运动阶段所对应的相位角; 设计了以运秸螺旋输送器和运秸叶片为主的机械输送装置、以抛秸风叶和运秸导管为主的气力输送装置。对秸秆输送量进行分析, 明确了运秸螺旋输送器结构参数, 得出了运秸螺旋输送器最低转速; 对运秸叶片和抛秸风叶进行了动力学分析, 确定了运秸叶片和抛秸风叶结构, 明晰了影响秸秆输送效果的关键因素为机具前进速度、运秸螺旋输送器转速、抛秸风叶转速、运秸叶片倾角和抛秸风叶倾角, 并确定了影响因素范围。仿真试验结果表明, 机具前进速度和运秸螺旋输送器转速存在交互作用, 最佳作业参数: 机具前进速度为3 km/h、运秸螺旋输送器转速为1 200 r/min和抛秸风叶转速为1 600 r/min。田间试验结果表明, 平均秸秆捡拾率和平均深埋率分别为91.02%、90.03%; 运秸导管出口处风速和作业扭矩分别为1.78~26.83 m/s、61.55~214.78 N·m, 各工作部件运行稳定, 满足秸秆深埋还田作业要求, 为秸秆深埋还田机研发和改进提供了依据。

关键词: 秸秆捡拾粉碎深埋还田机; 直注式; 捡拾装置; 机械-气力输送装置

中图分类号: S224.29

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)07-0083-13

OSID: 

Design and Experiment of Direct-injection Straw Picking and Crushing Deep Burying Machine

TONG Zhenwei^{1,2} LI Hongwen^{1,2} LU Caiyun^{1,2} WANG Chao^{1,2} ZHONG Guangyuan^{1,2} LIN Han^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

2. Cultivated Land Conservation Agricultural Science Observation and Experiment Station, Northern Hebei Province, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the quality of straw deep burial, a direct-injection straw deep burial method was proposed to address the problems of poor straw picking effect, single conveying method, low conveying efficiency, and low deep burial rate during the straw deep burial process. A direct injection straw picking, crushing, and deep burial machine was designed, and the overall structure and working principle were explained. Design and analysis were conducted on key components, and a nonprotective ring-type pickup device was designed. The movement stages of the pickup device and the trajectory of the tines were analyzed, and the phase angles corresponding to the four-movement stages were determined. A mechanical conveying device consisted of straw conveying screws and blades, and a pneumatic conveying device mainly consisted of straw ejection fan blades and straw conveying ducts. The straw conveying capacity was analyzed, the straw conveying screw's structural parameters were determined, and the straw conveying screw's minimum speed was obtained. An analysis of straw conveying blades, straw ejection fan blades, and straw conveying ducts clarified that the key factors affecting straw transport effectiveness were machine forward speed, straw conveying screw rotational speed, straw ejection fan blades rotational speed, angle of straw conveying blades, and angle of straw ejection fan blades. The simulation experiment results showed an interaction between the machine's forward speed and the rotational speed of the straw conveying screw. The optimal operating parameters were machine forward

收稿日期: 2023-11-15 修回日期: 2023-12-23

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-03)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(15053349)

作者简介: 仝振伟(1992—), 男, 博士生, 主要从事保护性耕作技术与装备研究, E-mail: tongzhenwei917@163.com

通信作者: 李洪文(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事保护性耕作技术与装备研究, E-mail: lhwen@cau.edu.cn

speed of 3 km/h, straw conveying screw rotational speed of 1 200 r/min, and straw ejection fan blades rotational speed of 1 600 r/min. Field experiments were conducted on a direct injection straw picking and crushing deep burying machine. The results showed that the average straw picking rate and average deep burying rate were 91.02% and 90.03%, respectively. The range of wind speed and operating torque at the outlet of the straw conveying duct was 1.78 ~ 26.83 m/s and 61.55 ~ 214.78 N·m, respectively. All working components operated well, and the operating quality was stable. The experimental results met the design requirements and can achieve the operation of straw-deep burial and returning to the field, providing a basis for developing and improving straw-deep burial and returning machines.

Key words: straw picking chopping, deepburial and returning machine; direct injection; picking device; mechanical pneumatic conveying device

0 引言

玉米秸秆还田具有疏松土壤、增加土壤孔隙度、改善土壤耕层结构^[1-3]、蓄水保墒、增加土壤有机质^[4-6]等优点。按还田方式可分为直接还田和间接还田两类。秸秆直接还田是指将秸秆直接还于田间或机械简单处理后还于田间,以翻埋还田^[7]、混埋还田^[8]、覆盖还田^[9]和沟埋还田^[10]为主,还田效率高;秸秆间接还田是指秸秆先经过堆腐处理成有机肥,微生物发酵成饲料喂养动物后、形成畜禽粪便有机肥等方式进行还田,以堆沤还田、过腹还田、焚烧还田和沼渣沼液还田为主,还田效果好,但工序复杂^[11-12]。现阶段还田方式以直接还田为主,研究表明,秸秆深埋还田在减少地表秸秆覆盖量、增加播种通过性、蓄水保墒、提高土壤温度等方面效果显著^[13-16]。

深埋还田主要有:以犁耕翻埋^[17]、旋耕深埋^[18-20]为主的整体深埋,以开沟覆土深埋^[21]为主的条带深埋。整体深埋土壤扰动大、作业功耗大;而条带深埋具有土壤扰动小,便于后续播种等优点。在条带深埋中,秸秆收集方式与输送方式是影响深埋效果的重要因素。陈桂斌等^[24]采用动定刀捡拾粉碎、集秆螺旋器进行秸秆输送,实现秸秆条带捡拾深埋,秸秆深埋合格率为 64.2%,深埋效果较差;郑智旗等^[25]采用滑道弹齿捡拾,单一螺旋输送,然后实现开沟覆土掩埋,可调节秸秆掩埋量;白雪卫等^[26]针对秸秆捡拾率低、捡拾含土率高等问题,对比分析了 Y 形甩刀、L 形甩刀、锤爪形甩刀,得到锤爪形甩刀漏拾率最低,为 4.0%;田阳等^[27-28]、窦森^[29]和 GU 等^[30]针对合理耕层构建要求,采用气力输送方式进行秸秆输送,抛撒至沟内,实现深埋;王瑞丽等^[31]结合中耕机和螺旋输送器原理,采用单一螺旋输送秸秆,还田率达到 90.5%;TANG 等^[32]针对还田深度浅的问题,采用链式开沟装置开深沟,滑道弹齿捡拾秸秆,然后采用传动带进行秸秆输送,完成深埋。

综上所述,在秸秆收集方式上,主要有 Y 形动定刀捡拾、锤爪式捡拾和弹齿滑道滚筒式捡拾等,存在秸秆捡拾效果差、易缠绕等问题。在秸秆输送方式上,主要有单一螺旋输送、单一气力输送和传送带输送等,存在适应性差、输送效率低等问题。

为提升秸秆深埋质量,针对上述问题,本文结合农艺要求,设计直注式秸秆捡拾粉碎深埋机(直注式是指秸秆通过运秸导管直接注入由原位起土装置作业后形成的后方空间内,土壤回落完成秸秆深埋作业)。采用无护圈式秸秆捡拾装置,实现秸秆高效捡拾;采用机械与气力相结合的方式输送秸秆,实现秸秆有效深埋。通过对关键部件理论分析,得到其结构参数和运动参数;通过仿真分析和田间试验,验证机具作业性能,以期为秸秆深埋还田机研究提供参考。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

直注式秸秆捡拾粉碎深埋机如图 1 所示,主要由三点悬挂装置、传动系统、机架、捡拾装置、粉碎装置、机械-气力输送装置、起垄装置、原位起土装置、整形镇压装置和限深装置等组成。其中传动系统由锥齿轮变速箱、联轴器、圆柱齿轮变速箱、皮带传动、链传动等组成;机械-气力输送装置包括机械输送装

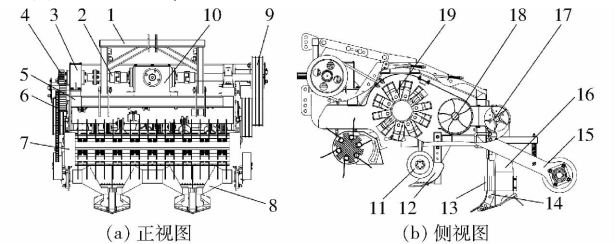


图 1 直注式秸秆捡拾粉碎深埋机结构简图

Fig. 1 Structural diagram of direct-injection straw

picking and crushing deep burying machine

- 1. 三点悬挂装置 2. 联轴器 3. 圆柱齿轮变速箱 4. 齿轮传动
- 5. 机架 6. 链条传动 7. 捡拾装置 8. 仿垄形镇压辊 9. 皮带传动
- 10. 锥齿轮变速箱 11. 限深装置 12. 起垄装置 13. 减阻固定板
- 14. 原位起土装置 15. 整形镇压装置 16. 运秸导管
- 17. 气力输送装置 18. 机械输送装置 19. 粉碎装置

置与气力输送装置。

1.2 工作原理

直注式秸秆捡拾粉碎深埋机为后三点悬挂式牵引,拖拉机 PTO 输出经由锥齿轮变速箱为整机提供驱动力,通过带轮传动驱动粉碎装置、机械-气力输送装置,通过链轮传动驱动捡拾装置,直注式秸秆捡拾粉碎深埋机传动示意图如图 2 所示。其中,捡拾装置进行秸秆捡拾作业,粉碎装置进行秸秆粉碎作业,起垄装置进行起垄作业,原位起土装置在垄沟内完成原位起土作业,机械-气力输送装置进行秸秆转移输送作业,镇压装置进行土壤镇压以及垄形整理。

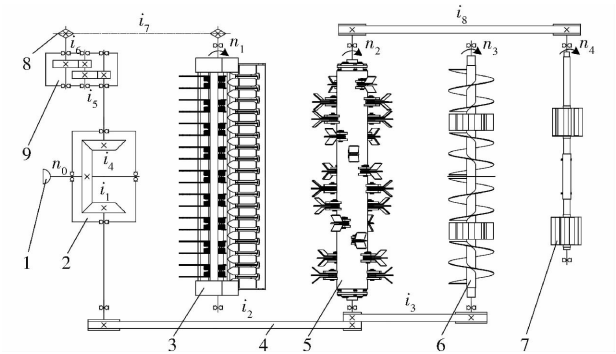


图 2 传动系统原理图
Fig.2 Schematic of transmission system

1. 拖拉机动力输出轴 2. 锥齿轮变速箱 3. 捡拾装置 4. 皮带传动 5. 粉碎装置 6. 机械输送装置 7. 气力输送装置 8. 链传动 9. 圆柱齿轮变速箱

秸秆深埋还田时,为均匀增加土壤肥力、提高土壤有机质,并保证后茬作物播种质量,提出一种秸秆深埋条带与后茬作物播种带交叉排列的种植模式。设计的机具作业幅宽为 1.2 m,分别设置 2 组起垄装置与原位起土装置,秸秆深埋条带为 2 行,深埋深度为 250 ~ 300 mm,深埋条带间距为 600 mm。在这种种植模式中,后茬作物均匀行种植,两行间距为 600 mm,所以形成了秸秆深埋条带与播种带依次交错排列。第 1 年,秸秆深埋条带在上茬作物种植行上,播种行在两行秸秆深埋条带之间;第 2 年,秸秆深埋条带与播种行交换位置,完成调换。与传统耕作方式相比,这种种植模式可实现秸秆还田与土地轮作的合理利用,有效均匀提高土壤有机物含量。

机具前进作业时,捡拾装置先进行秸秆捡拾,后输送至粉碎装置,秸秆粉碎后在甩刀的作用下向后抛撒,送至机械输送装置,在运秸螺旋输送器和运秸叶片的作用下输送至气力输送装置,秸秆在高速抛秸风叶作用下输送至由原位起土装置作业后形成的后方空间内,土壤回落完成秸秆深埋作业,后镇压辊对垄沟进行镇压,对垄形进行整形,形成整洁种床。

根据种植模式与农艺要求,直注式秸秆捡拾粉碎深埋机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 070 × 1 640 × 1 330
整机质量/kg	900
配套动力/kW	≥70
作业幅宽/mm	1 200
作业速度/(km·h ⁻¹)	3 ~ 5
秸秆埋深/mm	250 ~ 300

2 关键部件设计

2.1 捡拾装置

如图 3 所示,捡拾装置采用无护圈式,减少秸秆缠绕,便于更换弹齿。主要由固定侧板、仿形缓冲装置、护板、弹齿固定架、捡拾弹齿、刮秸板、捡拾动力输入轴等组成。其中弹齿安装于弹齿固定架上,在圆周上均匀设置 6 排,两弹齿间距 L_1 设置为 65 mm。为了避免石块、根茬损坏弹齿,设置仿形缓冲装置,实现捡拾装置上下浮动。

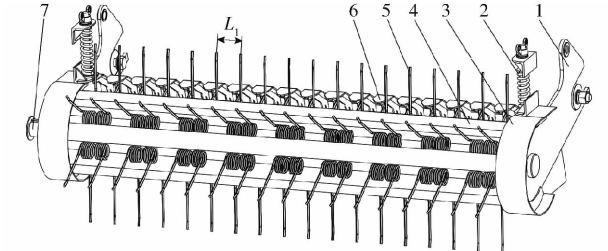


图 3 捡拾装置结构简图
Fig.3 Structure diagram of picking device

1. 固定侧板 2. 仿形缓冲装置 3. 护板 4. 弹齿固定架 5. 捡拾弹齿 6. 刮秸板 7. 捡拾动力输入轴

根据捡拾装置结构与运动方式可知^[33-34],捡拾弹齿随弹齿固定架作半径为 r_1 、转速为 n_1 的圆周运动,同时随机具以速度 v_0 向前运动。图 4 为弹齿圆周布置上①号弹齿运动轨迹(红色曲线),弹齿捡拾时,秸秆在田地地面的厚度为 h_1 ,捡拾弹齿离地最小高度为 h_2 。捡拾弹齿转动一周,每个捡拾弹齿均连续完成捡拾、抬升、抛送和空回 4 个阶段,图 5 为每个阶段所对应的相位图。以①号捡拾弹齿为例,结合图 4 和图 5 对捡拾弹齿 4 个运动阶段进行分析。

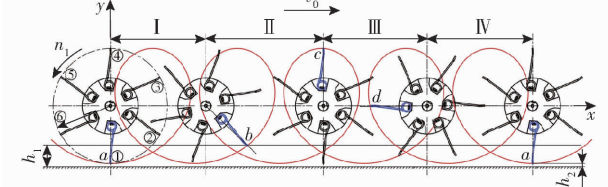


图 4 单个捡拾弹齿运动轨迹
Fig.4 Movement trajectory of single pickup tine

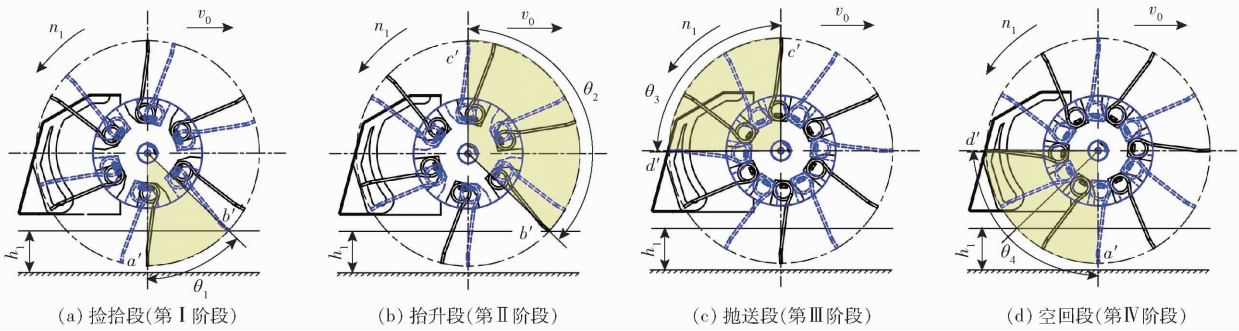


图 5 单个捡拾弹齿运动相位图

Fig. 5 Phase diagram of single pickup time movement

(1)捡拾段:捡拾弹齿在第 I 阶段作业过程中,对应的捡拾弹齿相位角为 θ_1 ,由点 a 运动到点 b ,转动角度为 $360^\circ + \theta_1$,完成 2 次捡拾作业(图 4)。初始时,捡拾弹齿在点 a' 开始接触秸秆,捡拾弹齿基本处于垂直向下,捡拾弹齿端点距地面距离最小,运动至点 b' 的角度 θ_1 范围内,在捡拾弹齿转动速度和机具前进速度合成速度作用下,将地表秸秆挑起,在点 b' 离开地表(图 5a)。

(2)抬升段:捡拾弹齿在第 II 阶段作业过程中,对应的捡拾弹齿相位角为 θ_2 ,由点 b 运动到点 c ,转动角度为 $360^\circ + \theta_2$,完成 2 次抬升作业(图 4)。抬升段初始时位于点 b' ,随捡拾弹齿转动,齿端线速度由斜向前变为斜向后,运动至点 c' ,完成秸秆抬升(图 5b)。

(3)抛送段:捡拾弹齿在第 III 阶段作业过程中,对应的捡拾弹齿相位角为 θ_3 ,由点 c 运动到点 d ,转动角度为 $360^\circ + \theta_3$,完成 2 次抛送作业(图 4)。抛送段初始时位于点 c' ,此时,捡拾弹齿处于垂直状态,相对速度方向水平向后,随捡拾弹齿转动,将秸秆向后方抛送,运动至点 d' 的过程中,完成秸秆抛送。同时,在刮秸板作用下,可以有效完成捡拾弹齿与秸秆分离(图 5c)。

(4)空回段:捡拾弹齿在第 IV 阶段作业过程中,对应的捡拾弹齿相位角为 θ_4 ,由点 d 运动到点 a ,转动角度为 $360^\circ + \theta_4$,完成 2 次空回作业(图 4)。捡拾弹齿与秸秆分离时的点 d' 即为空回段初始点,捡拾弹齿由点 d' 运动至点 a' 时,弹齿基本在刮秸板内运动,完成弹齿空回作业(图 5d)。

根据捡拾装置回转运动规律、捡拾装置结构设计参数,以及田间秸秆层厚度不同,确定捡拾弹齿各阶段相位角分别为

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos \frac{r_1 + h_2 - h_1}{r_1} \\ \theta_2 = 180^\circ - \arccos \frac{r_1 + h_2 - h_1}{r_1} \\ \theta_3 = 90^\circ \\ \theta_4 = 90^\circ \end{cases} \quad (1)$$

2.2 机械-气力输送装置

如图 6 所示,机械-气力输送装置包括机械输送装置与气力输送装置。机械输送装置作业幅宽 L 为 1 200 mm,气力输送装置包含 2 个单体,2 个单体间距离 L_2 为 600 mm。

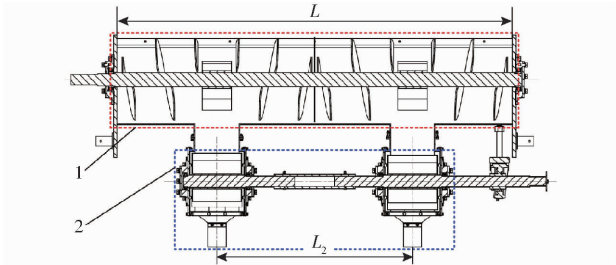


图 6 机械-气力输送装置结构简图

Fig. 6 Structure diagram of mechanical pneumatic conveying device

1. 机械输送装置 2. 气力输送装置

2.2.1 机械输送装置

如图 7 所示,机械输送装置主要分为螺旋输送和运秸叶片输送,主要由侧板、运秸螺旋输送器轴、运秸螺旋输送器、运秸叶片、隔板和输送壳体等组成。机具作业时,机械输送装置以隔板为界将粉碎装置抛送过来的秸秆分为两部分分别输送,两部分螺旋输送器叶片对称布置,将秸秆集中向运秸叶片输送,完成机械部分输送作业。

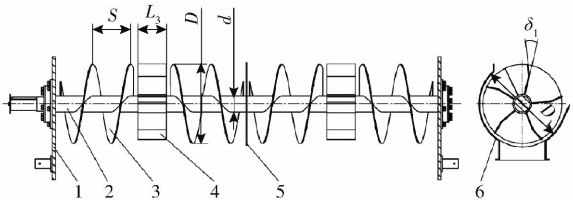


图 7 机械输送装置结构简图

Fig. 7 Structure diagram of mechanical conveying device

1. 侧板 2. 运秸螺旋输送器轴 3. 运秸螺旋输送器 4. 运秸叶片 5. 隔板 6. 输送壳体

(1)运秸螺旋输送器

在秸秆输送过程中,机械输送装置中运秸螺旋输送器输送量应大于或等于机具最大喂入量,而影

响运秸螺旋输送机作业效果的重要因素为运秸螺旋输送机螺距 S 、直径 D 、转速 n_3 。

根据螺旋输送机设计与理论,设计螺旋输送机叶片直径 D 为 250 mm、旋转轴直径 d 为 50 mm、螺距 S 为 120 mm,螺旋输送机叶片采用厚度 3 mm 的碳素结构钢 Q235 加工而成,螺旋输送机叶片与输送壳体间间隙为 10 mm。经过实地测量,田间玉米秸秆量为 $1.0 \sim 1.2 \text{ kg/m}^2$,按工作幅宽 1.2 m、前进速度 $3 \sim 5 \text{ km/h}$ 计算,整个机具秸秆喂入量为 $3\,600 \sim 7\,200 \text{ kg/h}$ 。所设计的运秸螺旋输送机分为 4 段,以中间隔板和 2 个运秸叶片隔开,螺旋输送机转动,秸秆在左右两侧分别向运秸叶片运动,即单侧最大喂入量 q_1 为 $1\,800 \text{ kg/h}$ 。则秸秆输送量满足^[35]

$$47D^2\varphi_1Sn_3\rho C_1 \geq q_1 \quad (2)$$

式中 φ_1 ——填充系数,取 0.2

ρ ——秸秆堆积密度,取 243 kg/m^3

C_1 ——倾斜输送修正系数,水平输送时取 1

由式(2)可得,运秸螺旋输送机转速 n_3 最低为 105.1 r/min 。

(2) 运秸叶片

根据运秸叶片倾角 δ_1 不同,设定倾角方向与运秸叶片转向相同时为正倾,与运秸叶片转向相反时为反倾,无倾斜时为径向,由此设计正倾、径向和反倾 3 种形式,如图 8 所示。其中径向为正倾或反倾时,倾角为 0 时的特殊情况。对运秸叶片正倾与反倾进行分析,计算秸秆在抛送过程中的受力^[36]。

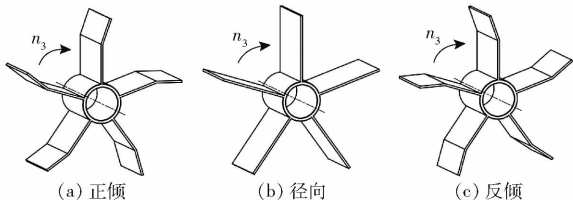


图 8 运秸叶片 3 种形式

Fig. 8 Three forms of transporting straw blades

秸秆进入运秸叶片时,随运秸叶片旋转做旋转运动,同时在运秸叶片上做滑移运动。秸秆在运秸叶片上滑移过程中的受力情况如图 9 所示,秸秆主要受到自身重力 mg ,在旋转运动过程中受到离心力 $m\omega_3^2r$ 、哥氏力 $2m\omega_3 \frac{dl}{dt}$,在运秸叶片上滑移时受到摩擦力 fN 、法向支持力 N 。运秸叶片在抛扔秸秆时,气流对秸秆的作用力远小于离心力,因此忽略不计。气流作用主要影响秸秆离开运秸叶片后的运动。

以反倾风叶为例进行分析,假定秸秆在运秸叶片上滑移初速度为 0,则秸秆受到正压力 N 为

$$N = 2m\omega_3 \frac{dl}{dt} + mg\sin\beta - m\omega_3^2\sin\delta \quad (3)$$

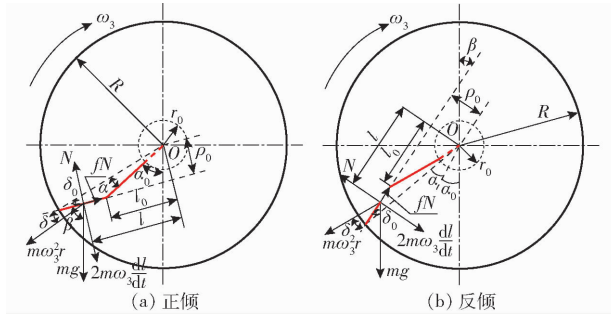


图 9 秸秆在滑移过程中的受力分析

Fig. 9 Stress analysis of straw during slipping process

式中 m ——秸秆质点质量,kg

g ——重力加速度, m/s^2

t ——时间,s

ω_3 ——运秸叶片角速度, rad/s

r ——秸秆质点到运秸叶片轴心的距离,m

δ ——运秸叶片与径向叶片之间的夹角,规定正倾叶片角度为正, ($^\circ$)

l ——秸秆质点动坐标,m

β ——叶片与重力方向夹角, ($^\circ$)

在运秸叶片上滑移时,秸秆受到摩擦力 F_f 为

$$F_f = fN = f \left(2m\omega_3 \frac{dl}{dt} + mg\sin\beta - m\omega_3^2\sin\delta \right) \quad (4)$$

式中 f ——秸秆与运秸叶片间摩擦因数

秸秆在运动方向上受到合力 F 为

$$F = m\omega_3^2\cos\delta + mg\cos\beta \quad (5)$$

当 $F - F_f > 0$ 时,秸秆可以沿运秸叶片向外滑移;当 $F > 0$,且 $F < F_f$ 时,秸秆只有向外滑移的运动趋势,而不会向外滑移。

在运秸叶片正常工作时

$$m \frac{d^2l}{dt^2} = F - F_f \quad (6)$$

由此可得秸秆质点沿运秸叶片运动微分方程为

$$m \frac{d^2l}{dt^2} = m\omega_3^2\cos\delta + mg\cos\beta -$$

$$f \left(2m\omega_3 \frac{dl}{dt} + mg\sin\beta - m\omega_3^2\sin\delta \right) \quad (7)$$

即

$$\frac{d^2l}{dt^2} + 2\omega_3 f \frac{dl}{dt} - r\omega_3^2\cos\delta =$$

$$g\cos\beta - gf\sin\beta + f\omega_3^2\sin\delta \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} \beta = \alpha + \alpha_0 - \delta_0 \\ l = r\cos\delta \\ \alpha = \omega_3 t \end{cases} \quad (9)$$

式中 δ_0 ——运秸叶片安装角,规定正倾叶片角度为正, ($^\circ$)

α ——运秸叶片转动时间为 t 时转角, ($^\circ$)

α_0 ——初相位,即叶片与秸秆开始接触时的转角, ($^\circ$)

将式(9)代入式(8)中,解上述微分方程,可得

$$l = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} - \frac{g}{2\omega_3^2}(2\varphi + \beta) + fr\sin\delta \quad (10)$$

其中

$$\lambda_1 = -\omega_3 f + \omega_3 \sqrt{1 + f^2}$$
$$\lambda_2 = -\omega_3 f - \omega_3 \sqrt{1 + f^2}$$

$$C_1 = \frac{g}{4\omega_3^2}(\cos(2\varphi - \delta_0 + \alpha_0) - \sin(\varphi - \delta_0 + \alpha_0)) +$$

$$\frac{1 + \sin\varphi}{2(l_0 + f\rho_0)}$$

$$C_2 = \frac{g}{4\omega_3^2}(\cos(2\varphi - \delta_0 + \alpha_0) + \sin(\varphi - \delta_0 + \alpha_0)) +$$

$$\frac{1 - \sin\varphi}{2(l_0 + f\rho_0)}$$

$$\rho_0 = r\sin\delta = R\sin\delta_0 \quad \varphi = \arctan f$$

式中 φ ——摩擦角, ($^\circ$)

l_0 ——秸秆质点初始位置动坐标, m

ρ_0 ——运秸叶片轴心到叶片的距离, m

R ——运秸叶片外半径, m

对于径向叶片为

$$l' = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} - \frac{g}{2\omega_3^2}(2\varphi + \beta) \quad (11)$$

对于正倾叶片为

$$l'' = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} - \frac{g}{2\omega_3^2}(2\varphi + \beta) - fr\sin\delta \quad (12)$$

由式(10)~(12)可知, $l < l' < l''$ 。由于输送的秸秆同一时间 t 内运动此距离长度, 则当叶片反倾时, 秸秆沿叶片表面移动速度最高; 叶片正倾时, 速度较低。运动时间相同时, 秸秆通过相同距离时, $\omega_3 < \omega_3''$, 即反倾叶片转速低于正倾叶片。综上分析, 在运送秸秆时反倾叶片效率最高, 则设计运秸叶片为反倾。

如图 10 所示, 以运秸叶片旋转轴中心为坐标原点、以机具前进方向反方向为 x 轴、以垂直向上方向为 y 轴建立直角坐标系, 对运秸叶片反倾时进行运动分析, 运秸叶片以机具前进速度 v_0 向前运动, 以圆周角速度 ω_3 绕旋转轴轴心 O_1 作匀速圆周运动, 运秸叶片顶点运动轨迹如图 10 红色线所

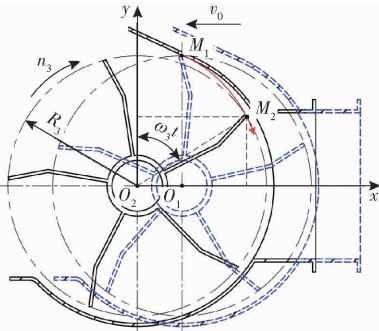


图 10 运秸叶片抛送过程分析

Fig. 10 Analysis of throwing process of straw transport blades

示。当运秸叶片由点 O_1 运动至点 O_2 时, 运秸叶片顶点由点 M_1 运动至点 M_2 , 则运秸叶片顶点运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = R_3 \sin(\omega_3 t) - v_0 t \\ y = R_3 \cos(\omega_3 t) \end{cases} \quad (13)$$

式中 x ——机具前进方向位移, m

y ——机具垂直方向上位移, m

R_3 ——运秸叶片顶点与旋转轴中心距离, m

由式(13)可知, 运秸叶片顶点运动轨迹线为余摆线, 根据余摆线运动规律, 运秸叶片线速度 v_t 与机具前进速度 v_0 比为 λ , 则

$$\lambda = \frac{v_t}{v_0} = \frac{\omega_3 R_3}{v_0} \quad (14)$$

其中

$$\omega_3 = \frac{\pi n_3}{30}$$

式中 n_3 ——运秸叶片转速, r/min

参考《农业机械设计手册》^[37], 秸秆顺利抛送时, $\lambda > 1$ 。综合考虑运秸叶片作业效率和效果, 取 $\lambda \geq 6$ 。根据机具前进速度为 3~5 km/h, 即机具最大作业速度 v_0 为 1.39 m/s。其中设计运秸叶片顶点与旋转轴中心距离 R_3 为 0.13 m。计算可得, 运秸叶片转速 n_3 为 612.62 r/min。

运秸叶片安装于运秸螺旋输送机上, 对于运秸螺旋输送机, 转速较低时, 秸秆不能顺利向运秸叶片移动, 易造成秸秆在输出口拥堵; 转速过大, 易造成机具振动。因此, 根据设计分析、机具传动系统设计和整机能耗, 圆整设定运秸螺旋输送机与运秸叶片转速为 600~1 200 r/min。运秸叶片倾角不同, 功率消耗不同。倾角过大时, 秸秆抛出时速度减小, 且存在返料的现象。参考《农业机械设计手册》^[37], 倾角一般以 $10^\circ \sim 20^\circ$ 为宜, 所以设计运秸叶片倾角 δ_1 为 20° 。

2.2.2 气力输送装置

如图 11 所示, 气力输送装置主要由抛秸风叶、风机壳体、运秸导管和辅助压秸装置等组成。其中气力输送装置对秸秆的作用分为 2 个阶段, 第 1 个阶段为秸秆在抛秸风叶上的运动, 第 2 个阶段为秸秆离开抛秸风叶进入运秸导管中的运动。

(1) 抛秸风叶上秸秆运动学分析

机械输送装置将秸秆经输出口输送至气力输送装置, 气力输送装置影响秸秆输送效果的主要部件是抛秸风叶。其中影响抛秸风叶作用效果主要包括风叶结构设计与运动参数两方面。根据抛秸风叶倾角 δ_2 , 设计抛秸风叶正倾、径向和反倾 3 种方式, 如图 12 所示。

根据欧拉方程, 假设抛秸风叶转动带动气体流

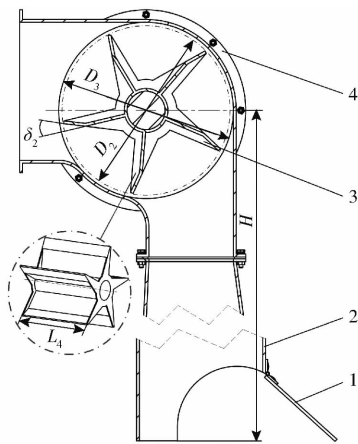


图 11 气力输送装置结构简图

Fig. 11 Structure diagram of pneumatic conveying device
1. 辅助压结装置 2. 运秸导管 3. 抛秸风叶 4. 风机壳体

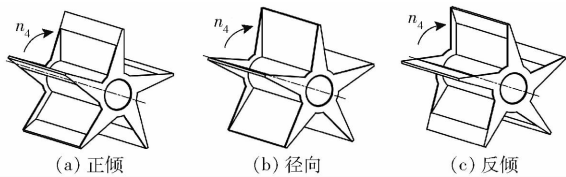


图 12 抛秸风叶 3 种形式

Fig. 12 Three forms of straw throwing blade

动, 气体为理想气体, 流体中没有能量损失, 抛秸风叶数无限多时, 则抛秸风叶轴功率为^[38]

$$N_1 = M\omega_4 \quad (15)$$

式中 N_1 ——抛秸风叶轴功率, W

M ——抛秸风叶轴转矩, N·m

ω_4 ——抛秸风叶角速度, rad/s

当风机流量为 Q_T (m³/s)、压力为 $P_{T\infty}$ (Pa) 时 (叶片数无限多时理论压力为 $P_{T\infty}$), 得到气流能量为

$$N = Q_T P_{T\infty} \quad (16)$$

根据假设气体为理想气体, 抛秸风叶的功全部转换为气流能量, 则由式 (15)、(16) 可得

$$P_{T\infty} = \frac{M\omega_4}{Q_T} \quad (17)$$

秸秆在抛秸风叶上的速度分析如图 13 所示, 秸秆在点 M_3 处有相对速度 U_r 和牵连速度 U_e , 两者的向量和速度为绝对速度 U_a , 绝对速度 U_a 与牵连速度 U_e 的夹角为 β_4 , 相对速度 U_r 与点 M_3 的径向线夹角为 δ_2 。

根据秸秆速度与动量矩定理, 可得抛秸风叶转动产生的压力为

$$P_{T\infty} = \rho' U_e^2 \left(1 + \frac{U_{a1}}{U_e} \tan \delta_2 \right) \quad (18)$$

式中 ρ' ——理想气体密度, kg/m³

U_{a1} ——抛秸风叶抛出时绝对速度在圆周方向速度分量, m/s

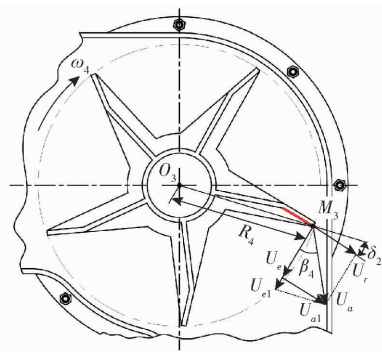


图 13 抛秸风叶速度分析

Fig. 13 Analysis of speed of straw throwing blades

δ_2 ——抛秸风叶倾角, (°)

由式 (18) 可知, 抛秸风叶产生的压力与叶片倾角有关, 即叶片正倾时获得压力最高, 叶片反倾时获得压力最小, 径向向叶片时获得的压力居中, 且抛秸风叶倾角过大会有返料现象。综上, 设计抛秸风叶为正倾, 倾角 δ_2 为 10°。

(2) 运秸导管中秸秆运动学分析

秸秆经高速旋转的抛秸风叶加速后, 脱离叶片进入运秸导管, 秸秆在运秸导管中运动会受到空气阻力的影响, 因此秸秆速度会受到部分影响, 需要对秸秆在运秸导管中的运动过程进行分析^[39]。建立如图 14 所示坐标系, 以秸秆脱离抛秸风机叶片位置为原点 o_0 , 前进方向为 x_0 轴, 垂直向下方向为 y_0 轴, 建立定坐标系 $o_0x_0y_0$ 。

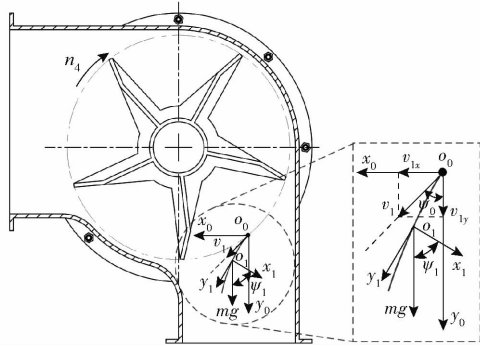


图 14 秸秆在运秸导管中运动过程分析

Fig. 14 Analysis of movement process of straw in straw transport tube

秸秆在运秸导管中所受空气阻力与运动速度方向相反, 且与速度平方呈正相关关系, 即

$$F_R = mgf(v_1^2) \quad (19)$$

其中

$$v_1 = \frac{ds_1}{dt} \quad (20)$$

式中 $f(v_1^2)$ ——空气阻力参数方程

v_1 ——秸秆在运秸导管中运动速度, m/s

s_1 ——秸秆在运秸导管中的运动距离, m

以秸秆中心为原点, 分别以秸秆运动轨迹的切线和法线建立坐标轴, 建立动坐标系 $o_1x_1y_1$, 对秸秆

在动坐标系下运动进行受力平衡分析,可得

$$\begin{cases} m \frac{dv_1}{dt} = mg \sin \psi_1 - mgf(v_1^2) \\ m \frac{v_1^2}{\rho_1} = mg \cos \psi_1 \end{cases} \quad (21)$$

式中 ρ_1 ——秸秆运动轨迹曲率半径,m
 ψ_1 ——动坐标系 o_1x_1 轴与垂直向下方向的夹角,(°)

代入初始条件,即秸秆初始速度为脱离运秸风叶叶片时的速度,可得秸秆在运秸导管中的运动参数方程为

$$\begin{cases} x_1 = \frac{1}{g} \int_{\psi_0}^{\psi_1} \left(g \cos \psi_1 \frac{v_1 \cos \psi_1 \tan \psi_1 dt - v_1 f(v_1) dt}{\cos \psi_1 dv_1} \right)^2 d\psi_1 \\ y_1 = \frac{1}{g} \int_{\psi_0}^{\psi_1} \left(g \cos \psi_1 \frac{v_1 \cos \psi_1 \tan \psi_1 dt - v_1 f(v_1) dt}{\cos \psi_1 dv_1} \right)^2 \cdot \tan \psi_1 d\psi_1 \end{cases} \quad (22)$$

式中 x_1 ——秸秆运动过程中在 o_0x_0 方向的位移,m
 y_1 ——秸秆运动过程中在 o_0y_0 方向的位移,m
 ψ_0 ——秸秆脱离运秸风叶叶片时的初速度方向与垂直向下方向的夹角,(°)

由式(22)可知,影响秸秆抛出位置和抛出速度的因素为抛秸风叶离地高度、抛秸风叶转速和机具前进速度。上述因素进而影响秸秆在垄沟内深埋效果。其中抛秸风叶转速与风机壳体内气流转动有关,转速过大时,加大气流在抛秸流场中的湍流程度,机构稳定性降低,秸秆与空气间的摩擦力增加,造成其功耗将逐渐增加,不符合高效低耗输送秸秆的要求;转速较小时,秸秆获得动能较小,容易拥堵,不利于秸秆在运秸导管内输送。根据机具体系传送系统布置,设置抛秸风叶转速为 1 600 ~ 2 000 r/min;根据秸秆深埋深度与机具结构设计,设置抛秸风叶与运秸导管出口处垂直距离 H 为 570 mm。

3 仿真试验

3.1 仿真模型及参数

在 Solidworks 中建立机械-气力输送装置模型,并导入 EDEM,设置各零部件材料为 45 号钢。同时建立直线型秸秆颗粒模型,直径为 16 mm,长度为 80 mm。离散元仿真参数设置如表 2 所示^[40-42]。

为保证仿真稳定性,设置其固定时间步长为 5.10×10^{-5} s,如图 15 所示,设置相应参数后,在 EDEM 软件中进行仿真,研究不同作业参数对输送秸秆的影响。

3.2 试验因素与方法

为了确定最佳运动参数,以机具前进速度、运秸

表 2 离散元仿真参数

Tab. 2 Discrete element simulation parameters

参数	数值
45 号钢泊松比	0.31
45 号钢剪切模量/Pa	7.0×10^{10}
45 号钢密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 800
秸秆泊松比	0.4
秸秆剪切模量/Pa	1.0×10^6
秸秆密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	240
45 号钢-秸秆颗粒动摩擦因数	0.01
45 号钢-秸秆颗粒静摩擦因数	0.30
45 号钢-秸秆颗粒恢复系数	0.30
秸秆-秸秆颗粒动摩擦因数	0.06
秸秆-秸秆颗粒静摩擦因数	0.63
秸秆-秸秆颗粒恢复系数	0.30
重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	9.81

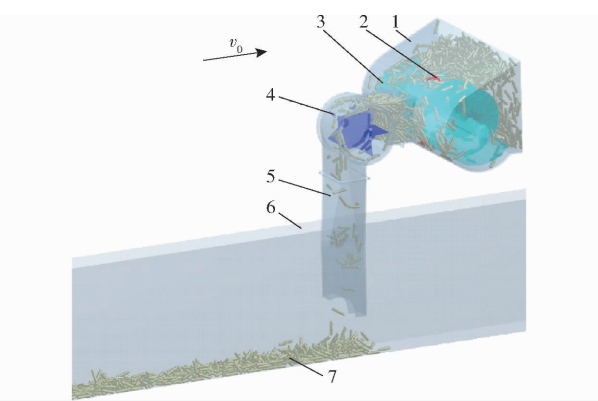


图 15 仿真过程

Fig. 15 Process of simulation

1. 输送壳体 2. 运秸风叶 3. 运秸螺旋输送器 4. 抛秸风叶
5. 运秸导管 6. 秸秆收集盒 7. 秸秆颗粒

螺旋输送器转速和抛秸风叶转速为试验因素,将输送至秸秆收集盒内秸秆认定为深埋秸秆,以收集盒内的秸秆质量为评价指标进行三因素三水平正交试验^[43-44],确定试验因素最佳参数组合与交互作用影响。试验因素编码如表 3 所示。

表 3 仿真试验因素编码

Tab. 3 Simulation experiment factors and codes

编码	因素		
	机具前进速度 $v_0/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	运秸螺旋输送器 转速 $n_3/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	抛秸风叶转速 $n_4/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
-1	3	600	1 600
0	4	900	1 800
1	5	1 200	2 000

3.3 试验结果与分析

仿真结束后,通过 EDEM 软件 Analyst 模块,统计机械-气力输送装置稳定运行阶段,相同长度内秸秆收集盒内秸秆质量,应用 Design-Expert 软件进行数据处理和统计分析,如表 4 所示,表中 A 、 B 、 C 为

因素编码值。

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Experimental design and results

试验号	因素			秸秆质量 Y/kg
	A	B	C	
1	-1	1	0	3.35
2	1	-1	0	2.17
3	-1	0	1	3.09
4	1	1	0	2.64
5	0	1	1	3.11
6	0	0	0	2.77
7	-1	0	-1	3.08
8	0	0	0	2.74
9	0	1	-1	3.04
10	0	0	0	2.75
11	0	0	0	2.77
12	0	0	0	2.85
13	0	-1	-1	2.31
14	-1	-1	0	2.57
15	1	0	1	2.47
16	0	-1	1	2.24
17	1	0	-1	2.47

对正交试验结果进行多元线性回归,建立秸秆质量对机具前进速度、运秸螺旋输送机转速和抛秸风叶转速的二次多项式回归模型,剔除不显著项,其回归方程为

$$Y = 2.78 - 0.2925A + 0.3563B + 0.0012C - 0.0775AB - 0.098B^2$$

(23)

对正交试验结果进行显著性方差分析,结果如表 5 所示。秸秆质量 Y 二次回归模型 $P < 0.01$,说明回归模型极显著; A 、 B 影响极显著; AB 、 B^2 影响显著;失拟项 $P > 0.1$,失拟不显著,表明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合,能够正确反映秸秆质量 Y 与机具前进速度 A 、运秸螺旋输送机转速 B 和抛秸风叶转速 C 之间的关系,回归模型可以较好地优化试验中各种试验结果进行预测。由表 5 可得各因素对秸秆量影响由大到小为:运秸螺旋输送机转速 B 、机具前进速度 A 、抛秸风叶转速 C 。

当抛秸风叶转速为 1 800 r/min 时,机具前进速度与运秸螺旋输送机转速交互效应响应曲面如图 16 所示。在机具前进速度一定时,秸秆质量随运秸螺旋输送机转速增大而增大;运秸螺旋输送机转速一定时,秸秆质量随机具前进速度增大而减小。为获取机械-气力输送装置最优运动参数组合,对秸秆质量回归模型进行优化求解,以秸秆质量最大为优化目标得出,当机具前进速度为 3 km/h、运秸螺旋输送机转速为 1 200 r/min 时,抛秸风叶转速由 1 600 ~

表 5 方差分析

Tab. 5 Variance analysis of experimental results

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	1.77	9	0.196 6	55.84	<0.000 1 **
<i>A</i>	0.684 4	1	0.684 4	194.41	<0.000 1 **
<i>B</i>	1.02	1	1.02	288.38	<0.000 1 **
<i>C</i>	0.000 0	1	0.000 0	0.003 6	0.954 2
<i>AB</i>	0.024 0	1	0.024 0	6.82	0.034 8 *
<i>AC</i>	0.000 0	1	0.000 0	0.007 1	0.935 2
<i>BC</i>	0.004 9	1	0.004 9	1.39	0.276 6
<i>A</i> ²	0.000 1	1	0.000 1	0.024 2	0.880 7
<i>B</i> ²	0.040 4	1	0.040 4	11.49	0.011 6 *
<i>C</i> ²	0.000 0	1	0.000 0	0.010 8	0.920 3
残差	0.024 6	7	0.003 5		
失拟	0.017 1	3	0.005 7	3.04	0.155 7
误差	0.007 5	4	0.001 9		
总和	1.79	16			

注:**表示极显著($P < 0.01$),*表示显著($P < 0.05$)。

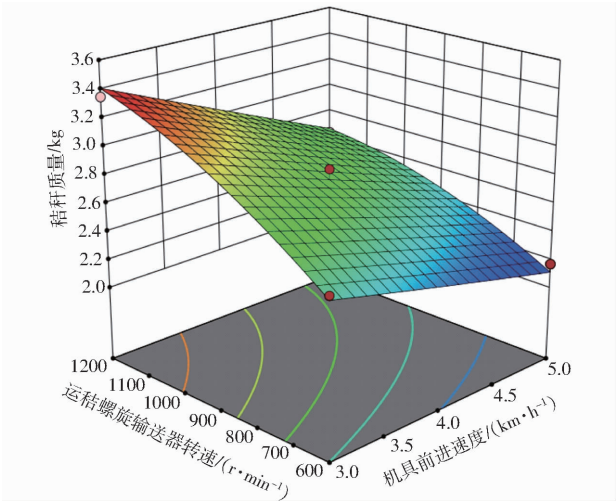


图 16 交互作用响应曲面

Fig. 16 Response surface for interaction

2 000 r/min 变化时,秸秆质量在 3.36 ~ 3.44 kg 之间变化,变化较小。考虑到能耗问题,最佳作业参数组合为:机具前进速度 3 km/h、运秸螺旋输送机转速 1 200 r/min、抛秸风叶转速 1 600 r/min。

4 田间试验

4.1 试验条件

为了验证所设计的直注式秸秆捡拾粉碎深埋机作业效果,在河南省郑州市上街区峡窝镇试验田进行了整机田间试验。试验时,主要测试仪器包括东方红 1604 型拖拉机、SC 900 型土壤紧实度测定仪、卡尺、土壤环刀、电子天平(精度 0.01 g)、ZH-1000TZ 型扭矩传感器和 JY3000 型风速风量风压仪。土壤为壤土,测定试验工况参数如表 6 所示。

表 6 试验工况参数
Tab.6 Test conditions parameters

参数	数值
土壤含水率/%	16.4
土壤密度/(kg·m ⁻³)	2 565
0 ~ 100 mm 土壤坚实度/kPa	391
100 ~ 200 mm 土壤坚实度/kPa	516
200 ~ 300 mm 土壤坚实度/kPa	573
秸秆直径/mm	11.83 ~ 18.86
秸秆含水率/%	15.95 ± 5
覆盖量/(kg·m ⁻²)	1.2

4.2 试验方法

按照直注式秸秆捡拾粉碎深埋机预期实现的设计功能,结合 GB/T 24675.6—2021《保护性耕作机械 第 6 部分:秸秆粉碎还田机》^[45]、JB/T 5160—2010《牧草捡拾器》^[46]等规定的试验方法进行田间试验。试验前对机具进行调试,设定机具前进速度为 3 km/h、运秸螺旋输送机转速为 1 200 r/min、抛秸风叶转速为 1 600 r/min、运秸叶片倾角为 20°、抛秸风叶倾角为 10°。试验选取捡拾率、深埋率、运秸导管出口处风速、作业扭矩等作为体现深埋机工作性能的测试指标;同时考察深埋机传动系统、限深装置、起垄装置、原位起土装置和整形镇压装置的工作运转情况。田间试验如图 17 所示。



图 17 田间试验
Fig.17 Field experiment

4.2.1 捡拾率和深埋率

作业前,在试验区域测定机具作业前地表秸秆覆盖量,作业后随机选取 5 点测定单位长度内地表秸秆量与深埋秸秆量(图 18a)。则秸秆捡拾率 Q_1 和深埋率 Q_2 为

$$Q_1 = \frac{W - W_1}{W} \times 100\%$$
 (24)

$$Q_2 = \frac{W_2}{W} \times 100\%$$
 (25)

式中 W ——作业前测试点秸秆质量,kg
 W_1 ——作业后测试点地表秸秆质量,kg
 W_2 ——作业后测试点深埋秸秆质量,kg

4.2.2 运秸导管出口处风速

在直注式秸秆捡拾粉碎深埋机空转时,采用 JY3000 型风速风量风压仪,根据伯努利方程,测量运秸导管出口处风速(图 18b),即

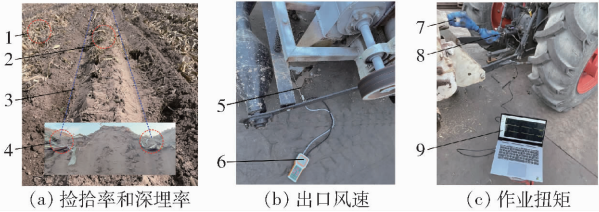


图 18 评价指标测定

Fig.18 Measurement of evaluation indicators

1. 作业前地表秸秆 2. 作业后地表秸秆 3. 作业后垄沟 4. 深埋秸秆 5. 测量探针 6. 风速测量仪 7. 联轴器 8. 扭矩传感器 9. 扭矩测量系统

$$v = K \sqrt{2 \Delta P \rho'} \tag{26}$$

式中 v ——运秸导管出口处风速,m/s
 K ——皮托管系数
 ΔP ——通过连接皮托管正负接口测得的压力,Pa

4.2.3 作业扭矩

为了试验整机传动系统稳定性以及作业能耗,对整机作业扭矩进行测量。试验前,将扭矩传感器一端与拖拉机后输出轴连接,另一端连接万向节,万向节另一端连接直注式秸秆深埋机变速箱。试验时,首先测定机具空转时扭矩,然后测定机具稳定作业时扭矩,机具实际作业扭矩为机具稳定作业扭矩减去空转时扭矩,重复 3 次取平均值(图 18c)。

4.2.4 机具工作稳定性

直注式秸秆捡拾粉碎深埋机稳定作业时,观察机具传动系统、捡拾装置和机械-气力输送装置等部件是否稳定作业,运秸导管是否拥堵等,评价机具作业稳定性。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 捡拾率和深埋率

图 18a 为田间作业完成后秸秆田间分布图,按照上述试验方法分别测量残余地表秸秆质量与深埋秸秆质量计算捡拾率和深埋率,结果如表 7 所示。捡拾率平均值为 91.02%,分析可得,捡拾率在 88% ~ 94% 之间变化,主要原因是受秸秆根茬的影响与地表秸秆分布不均的影响,导致捡拾率存在差异,满足

表 7 捡拾率和深埋率田间试验结果
Tab.7 Field test results of pickup rate and deep burial rate

deep burial rate		%
编号	捡拾率	深埋率
1	90.08	87.33
2	91.83	91.42
3	91.50	88.83
4	88.00	93.25
5	93.67	89.33
平均值	91.02	90.03

秸秆捡拾设计要求。秸秆捡拾粉碎后埋入土壤,统计土壤中秸秆质量,存在统计误差,导致深埋率在 87% ~ 94% 之间变化,平均深埋率为 90.03%,满足秸秆深埋还田设计要求。

4.3.2 风速和扭矩

通过风速测量仪测量拖拉机不同挡位,可得在抛秸风叶转速不同时,运秸导管出口处风速为 1.78 ~ 26.83 m/s,满足设计要求。通过扭矩传感器测得作业扭矩为 61.55 ~ 214.78 N·m,其变化主要受秸秆物理参数差异、秸秆分布不均导致捡拾量变化、机具振动和转速变化等影响,导致扭矩在一定范围内浮动,符合设计要求。

4.3.3 机具工作稳定性

试验结果表明,机具作业过程中,传动系统等工作部件稳定运转,秸秆粉碎合格率满足还田标准,捡拾装置、输送装置未发生堵塞现象。整形镇压装置镇压效果欠缺(图 18a),需要增加镇压力。

5 结论

(1)设计了直注式秸秆捡拾粉碎深埋机,分析了其作业原理与传动系统。对捡拾装置 4 个运动阶

段进行了分析,确定了捡拾装置运动轨迹,得出了各运动阶段对应的相位角。

(2)对机械-气力输送装置进行了结构设计与动力学分析,得出了影响秸秆输送效果的因素为机具前进速度、运秸螺旋输送机转速、抛秸风叶转速、运秸叶片倾角和抛秸风叶倾角。进而确定了运秸螺旋输送机、运秸叶片和抛秸风叶结构参数,得出了最低转动速度。对机械-气力输送装置各运动阶段进行了分析,确定了各部件的运动参数。

(3)仿真结果表明,影响秸秆质量的显著因素为机具前进速度和运秸螺旋输送机转速,其中机具前进速度和运秸螺旋输送机转速交互作用存在显著影响。确定最佳作业参数为机具前进速度 3 km/h、运秸螺旋输送机转速 1 200 r/min 和抛秸风叶转速 1 600 r/min。

(4)对直注式秸秆捡拾粉碎深埋机进行田间试验。试验结果表明,平均捡拾率为 91.02%,平均深埋率为 90.03%,运秸导管出口处风速为 1.78 ~ 26.83 m/s,作业扭矩为 61.55 ~ 214.78 N·m,各工作部件运转良好,作业质量稳定。试验结果满足设计要求,能够实现秸秆深埋还田作业。

参 考 文 献

[1] 匡恩俊,迟凤琴,张久明,等. 基于荧光光谱分析秸秆深埋还田黑土剖面 DOC 组分结构变化特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(10): 3243 - 3248.
KUANG Enjun, CHI Fengqin, ZHANG Jiuming, et al. Analysis of DOC component structure of black soil profile with straw deeply bried and based on fluorecence spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(10): 3243 - 3248. (in Chinese)

[2] CATES A M, RUARK M D, HEDTCKE J L, et al. Long-term tillage, rotation and perennialization effects on particulate and aggregate soil organic matter[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 371 - 380.

[3] WANG Xiaojuan, JIA Zhikuan, LIANG Lianyou, et al. Maize straw effects on soil aggregation and other properties in arid land [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 153: 131 - 136.

[4] AKHTAR K, WANG W, REN G, et al. Changes in soil enzymes, soil properties, and maize crop productivity under wheat straw mulching in Guanzhong, China[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 182: 94 - 102.

[5] SHAO J, GAO C, AFI S P, et al. Analysis of the available straw nutrient resources and substitution of chemical fertilizers with straw returned directly to the field in China[J]. Agriculture, 2023, 13(6): 1187.

[6] ZHANG X, SUN Z, LIU J, et al. Simulating greenhouse gas emissions and stocks of carbon and nitrogen in soil from a long-term no-till system in the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 32 - 40.

[7] 葛宜元,矫洪成,刘东旭,等. 基于 EDEM 的秸秆-土壤颗粒翻埋运动仿真及试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(7): 229 - 235.
GE Yiyuan, JIAO Hongcheng, LIU Dongxu, et al. Simulation and experiment of straw - soil particle overturning movement based on discrete element method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(7): 229 - 235. (in Chinese)

[8] 齐林. 玉米秸秆垄沟条带混埋还田机的设计与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
QI Lin. Design and experimental study of corn straw ridge-furrow-strip mixed burying and returning machine[J]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[9] 高盼,刘玉涛,徐莹莹,等. 秸秆覆盖与翻埋两种还田模式对农田土壤物理性质及玉米产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2021(11): 13 - 17.
GAO Pan, LIU Yutao, XU Yingying, et al. Effects of maize straw mulching and burying returning to the field on soil physical properties and maize yield[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2021(11): 13 - 17. (in Chinese)

[10] 张绪争. 秸秆集中沟埋还田一体机的设计与试验[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
ZHANG Xuzheng. Design and experiment of straw concentrated ditch-buried returning field machine[J]. Nanjing: Nanjing

Agricultural University, 2020. (in Chinese)

- [11] 肖健, 王娜, 杨会娜, 等. 秸秆还田对土壤理化性状和土壤微生物的影响[J]. 现代农业科技, 2023(5): 166–168, 173.
XIAO Jian, WANG Na, YANG Huina, et al. Effect of straw returning on soil physicochemical properties and soil microorganism[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(5): 166–168, 173. (in Chinese)
- [12] 赵凌霄, 姜丽娜, 马建辉, 等. 秸秆过腹还田配施氮肥对小麦-玉米周年产量及土壤理化性质的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(11): 26–36.
ZHAO Lingxiao, JIANG Li'na, MA Jianhui, et al. Effects of returning straw to field through cow's belly and applying nitrogen on annual yield of wheat and maize and soil physical and chemical properties[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(11): 26–36. (in Chinese)
- [13] 王秋菊, 刘峰, 焦峰, 等. 秸秆粉碎集条深埋机械还田对土壤物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 43–49.
WANG Qiuju, LIU Feng, JIAO Feng, et al. Effects of strip-collected chopping and mechanical deep-buried return of straw on physical properties of soil[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(17): 43–49. (in Chinese)
- [14] 张帅, 孔德刚, 常晓慧, 等. 秸秆深施对土壤蓄水能力的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(6): 127–129.
ZHANG Shuai, KONG Degang, CHANG Xiaohui, et al. Effect of straw deep application on soil water storage capacity[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(6): 127–129. (in Chinese)
- [15] 张媛媛, 杨忠浩, 党廷辉. 秸秆深埋配合减氮对旱塬春玉米水分利用的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 340–344, 353.
ZHANG Aiai, YANG Zhonghao, DANG Tinghui. Effects of deep straw burial combined with nitrogen reduction on water use of spring maize in dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 340–344, 353. (in Chinese)
- [16] 常晓慧, 孔德刚, 井上光弘, 等. 秸秆还田方式对春播期土壤温度的影响[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(5): 117–120.
CHANG Xiaohui, KONG Degang, INOUE Mitsuhiro, et al. Effect of different straw returning methods on soil temperature in spring sowing period[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(5): 117–120. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A. Furrow parameters in rotary strip-tillage: effect of blade geometry and rotary speed[J]. Biosystems Engineering, 2014, 118: 7–15.
- [19] SHI Y, REX S X, WANG X, et al. Numerical simulation and field tests of minimum-tillage planter with straw smashing and strip laying based on EDEM software[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 105021.
- [20] 王金峰, 杨东泽, 王震涛, 等. 水稻秸秆双轴深埋还田机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 21–30.
WANG Jinfeng, YANG Dongze, WANG Zhentao, et al. Design and experiment of rice straw biaxial deep-buried returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 21–30. (in Chinese)
- [21] 林静, 张桐嘉, 田阳, 等. 秸秆深埋还田仿生开沟装置优化与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 50–59, 67.
LIN Jing, ZHANG Tongjia, TIAN Yang, et al. Optimization and experiment on bionic deep-buried device for returning straw in field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 50–59, 67. (in Chinese)
- [22] 徐高明, 丁启朔, 汪小岳, 等. 秸秆-土壤-旋耕机交互下秸秆位移与埋覆效果研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 23–29.
XU Gaoming, DING Qishuo, WANG Xiaochan, et al. Analysis of straw displacement and burying effect in straw-soil-rotary tiller interaction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 23–29. (in Chinese)
- [23] 袁兴茂, 李霄鹤, 焦海涛, 等. 秸秆粉碎集中全量深埋还田机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊1): 27–35.
YUAN Xingmao, LI Xiaohe, JIAO Haitao, et al. Design and experiment of straw chopping centralized full depth and returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.1): 27–35. (in Chinese)
- [24] 陈桂斌, 卢彩云, 何进, 等. 秸秆条带捡拾粉碎深埋装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 16–27.
CHEN Guibin, LU Caiyun, HE Jin, et al. Design and experiment of straw pickup-crushed and deep buried device under strip-tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 16–27. (in Chinese)
- [25] 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]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 87–96.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, WANG Qingjie, et al. Design and experiment on straw pickup-chopping and ditch-burying integrated machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 87–96. (in Chinese)
- [26] 白雪卫, 郝岩, 白鑫, 等. 自走式秸秆制粒机捡拾装置设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(6): 697–707.
BAI Xuewei, HAO Yan, BAI Xin, et al. Design and experiment on picking-up device of mobile straw pelleter[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021, 52(6): 697–707. (in Chinese)
- [27] 田阳, 林静, 李宝筏. 气力式秸秆深埋还田机输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 36–44.
TIAN Yang, LIN Jing, LI Baofa. Design and test of conveying device of pneumatic straw deep burying and returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 36–44. (in Chinese)
- [28] 田阳, 林静, 李宝筏, 等. 气力式1JH-2型秸秆深埋还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 10–18.
TIAN Yang, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test of pneumatic 1JH-2 style straw deep burying and returning machine

- [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 10–18. (in Chinese)
- [29] 窦森. 秸秆“富集深还”新模式及工程技术[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 553–560.
DOU Sen. New model of “straw enrichment and deep incorporation” and engineering techniques[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(3): 553–560. (in Chinese)
- [30] GU Fengwei, ZHAO Youjun, WU Feng, et al. Simulation analysis and experimental validation of conveying device in uniform rushed straw throwing and seed-sowing machines using CFD–DEM coupled approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106720.
- [31] 王瑞丽, 柴佳佳, 许方剑, 等. 秸秆直注深埋还田机设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(5): 634–640.
WANG Ruili, CHAI Jiajia, XU Fangjian, et al. Design and experiment of direct injection straw deep bury and returning machine[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(5): 634–640. (in Chinese)
- [32] TANG Han, XU Changsu, XU Wenlong, et al. Method of straw ditch-buried returning, development of supporting machine and analysis of influencing factors[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 967838.
- [33] 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 Shenyong, 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)
- [34] 王申莹, 胡志超, 吴峰, 等. 全喂入花生捡拾收获机喂入量建模与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 29–36.
WANG Shenyong, HU Zhichao, WU Feng, et al. Modeling and experiment of feeding rate for full-feed peanut pickup harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 29–36. (in Chinese)
- [35] 王明友, 宋卫东, 周德欢, 等. 平菇发酵料装料接种关键装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 12–21.
WANG Mingyou, SONG Weidong, ZHOU Dehuan, et al. Design and experiment of the key components of charging and inoculating integrated machine for *Pleurotus ostreatus*[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(1): 12–21. (in Chinese)
- [36] 胡瑞谦. 质点在绕水平轴等速旋转平面型叶片上运动的分析[J]. 农业机械学报, 1980, 11(4): 62–72.
HU Ruiqian. The motive analysis of particle which is on the blade of plane type, the blade rotate round a horizontal axle with constant angular velocity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1980, 11(4): 62–72. (in Chinese)
- [37] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
- [38] 李国清. 揉碎物料抛送装置理论分析与试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
LI Guoqing. The theory analysis and experimental study of the throwing mechanism on the tearing material[J]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [39] 王英博, 李洪文, 王庆杰, 等. 机械式小麦射播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 73–84.
WANG Yingbo, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of wheat mechanical shooting seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 73–84. (in Chinese)
- [40] TONG Z, LI L, ZHANG X, et al. Design and experiment of the components for soil flow direction control of hilling machine based on EDEM[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(3): 122–131.
- [41] FANG M, YU Z, ZHANG W, et al. Friction coefficient calibration of corn stalk particle mixtures using Plackett–Burman design and response surface methodology[J]. Powder Technology, 2022, 396: 731–742.
- [42] 王洪波, 樊志鹏, 乌兰图雅, 等. 揉碎玉米秸秆螺旋输送仿真离散元模型参数标定[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(3): 96–106.
WANG Hongbo, FAN Zhipeng, Wulantuya, et al. Parameter calibration of discrete element model for simulation of crushed corn stalk screw conveying[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(3): 96–106. (in Chinese)
- [43] 金诚谦, 李庆伦, 倪有亮, 等. 小麦联合收获机双出风口多风道清选作业试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 26–34.
JIN Chengqian, LI Qinglun, NI Youliang, et al. Experimental study on double air outlet multi-ducts cleaning device of wheat combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 26–34. (in Chinese)
- [44] 张青松, 齐涛, 敖倩, 等. 油菜机械直播机开沟浅旋装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 58–67.
ZHANG Qingsong, QI Tao, AO Qian, et al. Design and experiment of rapeseed direct seeding machine with furrow opener and shallow plowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 58–67. (in Chinese)
- [45] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 保护性耕作机械 第 6 部分: 秸秆粉碎还田机: GB/T 24675.6—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [46] 中华人民共和国工业和信息化部. 牧草捡拾器: JB/T 5160—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.