doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.005

前置式大垄原茬地种床整备装置设计与试验

陈海涛　魏志鹏　苏文海　侯守印　纪文义　史乃煜
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为解决东北寒区部分播种机在秸秆重度覆盖还田地区无法正常播种作业问题,基于 2BMFJ-DL4 型原茬地免耕精量播种机侧向清秸覆秸原理,结合玉米大豆 1.1 m 大垄轮作宽窄行种植模式,设计了一种前置式原茬地种床整备装置。通过理论分析和计算机仿真,设计了装置结构和液压系统,确定了其作业关键参数范围,液压系统分析结果表明,液压悬挂系统和液压驱动系统各执行元件的同步性能、转速和扭矩均满足作业技术要求。应用 Design-Expert 8.0.6 软件和三因素三水平正交试验方法,以作业速度、种床整备单元组刀轴转速和种床整备刀齿入土深度为试验因素,以清秸率、覆秸均匀度和每个种床整备单元组刀轴旋转功耗为评价指标,实施参数组合优化田间试验。结果表明,在参数组合为作业速度 7.2 km/h、种床整备单元组刀轴转速 600 r/min、种床整备刀齿入土深度 30 mm 时,清秸率为 91.03%,覆秸均匀度为 92.61%,每个种床整备单元组刀轴旋转功耗为 7.96 kW,性能满足生产农艺技术要求;研究结果为提高播种机利用率和原茬地免耕覆秸播种机械化技术模式在玉米秸秆全量还田地区的推广应用提供了技术支持。

关键词: 保护性耕作; 玉米原茬地; 种床整备装置; 清秸覆秸; 正交试验
中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)10-0051-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Cleaning and Anti-blocking of Front-mounted Seed Bed Preparation Device for Grand Ridge with Raw Stubble

CHEN Haitao　WEI Zhipeng　SU Wenhai　HOU Shouyin　JI Wenyi　SHI Naiyu
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In order to solve the problem that part of the planter could not normally sow in the area with heavy straw mulching in the cold region of Northeast China, based on the principle of 2BMFJ-DL4 no-tillage precision planter in the primary stubble field, combining with the wide and narrow row planting pattern of 1.1 m large ridge rotation of corn and soybean, a kind of front-mounted seed bed preparation device for primary stubble field was designed. The front-mounted seed bed preparation device and the active seeder constituted a no-tillage and seeding over straw compound operation machine, which can complete a number of functions such as seed bed preparation, straw moderate crushing, no-tillage and seeding, straw mulching and returning to the field. Through theoretical analysis and computer simulation, the structure and hydraulic system of the device were designed, and the range of the key parameters of operation was determined. The results of hydraulic system analysis showed that the synchronous performance, speed and torque of the actuator of the hydraulic suspension system and the hydraulic drive system all met the technical requirements. Using Design-Expert 8.0.6 software and three-factor and three-level orthogonal test method, the field experiment of parameter combination optimization was carried out, with the operating speed, the rotation speed of the blade shaft of the seed bed conditioning unit group and the penetration depth of the blade of the seed bed conditioning unit group as the test factors, and the straw clearing rate, the overlaying straw uniformity and the rotating power consumption of the blade shaft of each seed bed conditioning unit group as the evaluation indexes. For straw clearing rate, the order of primary and secondary effects was as follows: operating speed, penetration depth of the

收稿日期: 2021-07-31　修回日期: 2021-08-17
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0201004)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(GARS-04)
作者简介: 陈海涛(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备及生物质材料研究,E-mail: htchen@neau.edu.cn
通信作者: 侯守印(1986—),男,高级工程师,博士,主要从事旱作农业装备研究,E-mail: houshouyin.cn@163.com

blade, and rotation speed of the blade shaft of the seed bed conditioning unit group. For overlaying straw uniformity, the order of primary and secondary effects was as follows: rotation speed of the blade shaft of the seed bed conditioning unit group, operating speed, and penetration depth of the blade. For rotating power consumption of the blade shaft of each seed bed conditioning unit group, the order of primary and secondary effects was as follows: operating speed, penetration depth of the blade, and rotation speed of the blade shaft of the seed bed conditioning unit group. When the parameter combination was the operating speed of 7.2 km/h, the blade shaft rotation speed of the seed bed unit group was 600 r/min, and the penetration depth of the seed bed gear was 30 mm, the straw removal rate was 91.03%, the overlying straw uniformity was 92.61%, and the rotation power of the blade shaft of each seed bed unit group was 7.96 kW. The performance met the production agronomic technical requirements. The results provided technical support for improving the utilization rate of seeder and the popularization and application of the mechanization technology mode of no-tillage and straw seeding in the original stubble field in the areas where the total amount of corn straw returned to the field.

Key words: conservation tillage; corn stubble land; seed bed preparation device; remove and mulch stalks; orthogonal experiment

0 引言

保护性耕作是通过少耕、免耕、地表微地形改造等方式在秸秆覆盖农田上播种的先进技术,具有提高作物产量、减少土壤侵蚀、蓄水保墒、提高地力等优点[1-4],是保证农业可持续性发展的有效方法之一[5-7]。保护性耕作技术与大垄宽窄行种植模式结合是黑龙江地区保证粮食产量持续增长的重要方法之一,与常规垄种植模式相比,大垄宽窄行种植模式作物植株的田间分布更为合理,通风透光性能更好,植株群体内竞争较小,可充分利用周围环境中的水肥资源[8-10]。

性能稳定的原茬地种床整备装置是保护性耕作与大垄宽窄行种植模式结合的关键,现有种床整备装置分为主动式和被动式[11-14],主动式整备装置利用旋耕刀、灭茬刀、清秸刀等部件高速旋转将秸秆和根茬破碎、混合、抛撒和覆盖,清秸效果好,但存在土壤水分流失大,秸秆覆盖量大时作业速度慢等问题。被动式整备装置主要借助机具自重使破茬圆盘、拨草轮等装置入土滚动,通过锋利的边刃将秸秆和根茬切断[15-17],作业速度快,但在秸秆重度覆盖地区易发生堵塞、拖堆等问题,影响种床整备和播种质量。

2BMFJ-DL4 型原茬地免耕精量播种机侧向清秸覆秸原理适用于秸秆重度覆盖原茬地的免耕播种,在播种机前进过程中,通过驱动种床整备装置内的刀轴旋转将秸秆和根茬侧向抛出,再由后方的施肥播种单体完成施肥、播种、覆土镇压、药剂喷施等工作,当播种机返程时,从种床整备装置侧面抛撒出的秸秆对相邻苗带进行均匀覆盖,保墒效果好[18-19]。但其无法解决已有其他类型播种机在重度秸秆覆盖地区正常播种的问题。

本文在 2BMFJ-DL4 型原茬地免耕精量播种机侧向清秸覆秸原理的基础上,为解决秸秆重度覆盖还田地区部分播种机无法正常播种作业问题,通过理论分析和计算机仿真,设计一种适用于玉米大豆 1.1 m 大垄轮作宽窄行种植模式(垄间行距 650 mm,垄上行距 450 mm)的前置式原茬地种床整备装置,并采用正交试验优化设计方法探究其作业参数优化组合,以期为提高播种机利用率和原茬地免耕播种覆秸机械化技术模式在秸秆重度覆盖地区的应用推广提供技术支持。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

针对黑龙江地区玉米大豆 1.1 m 大垄轮作宽窄行种植模式,设计的前置式原茬地种床整备装置(以下简称种床整备装置)总体结构如图 1 所示,主要由机架、地轮、种床整备单元组、控秸板、液压系统、前悬挂机构等部分组成,总体为对称结构。主要技术参数如表 1 所示。

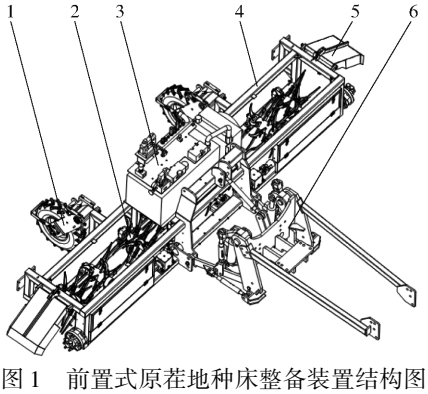


图 1 前置式原茬地种床整备装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of front-mounted seed bed preparation device for original stubble field

1. 地轮 2. 种床整备单元组 3. 液压系统 4. 机架 5. 控秸板 6. 前悬挂机构

表 1　主要技术参数

Tab. 1　Major technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	4.5×1.9×1.6
配套动力/kW	130～190
整机质量/kg	2 000
液压系统压力/MPa	25
垄距/m	1.1
工作幅宽/m	4.4
作业速度/(km·h^{-1})	≤7.2
刀轴转速/(r·min^{-1})	400～600
入土深度/mm	30～50

1.2　工作原理

如图 2 所示，种床整备装置通过前悬挂机构与拖拉机前部连接，拖拉机后部挂接播种机组成免耕精播覆秸作业机组，可一次进地完成 4 个 1.1 m 原茬大垄的全部播种作业环节。拖拉机通过动力输出轴带动液压泵旋转输出液压油，液压油经过各调节控制阀驱动液压马达带动种床整备单元组刀轴旋转，完成清秸防堵种床整备工作。

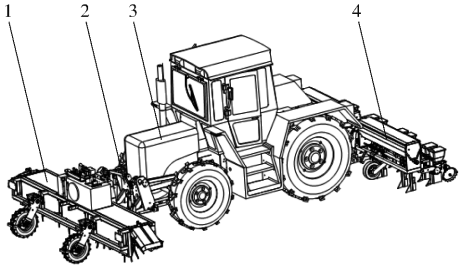


图 2　免耕精播覆秸作业机组结构示意图

Fig. 2　Schematic of precision sowing and straw covering operation no-tillage unit

1. 种床整备装置　2. 前悬挂机构　3. 拖拉机　4. 播种机

种床整备装置作业时，原茬地表的秸秆和根茬由种床整备单元组适度粉碎并从种床整备装置两侧抛出，构建出干净待播的种床后由播种机进行播种。当免耕精播覆秸作业机组返程播种时，从种床整备装置侧面抛撒出的秸秆均匀覆盖在前幅播种苗带上[20]。拖拉机驾驶室安装有种床整备单元组转速监测表，驾驶员可以根据作业状态随时调节种床整备单元组刀轴转速，在保证种床整备质量前提下提高作业效率。前悬挂机构由液压系统提供液压力，通过提升油缸伸缩带动下拉杆运动，控制种床整备装置的浮动、提升和下降，并通过调节液压阀改变升降速度和状态。

2　关键部件设计与分析

2.1　种床整备单元组设计

种床整备单元组是完成秸秆及根茬清除、抛撒、覆盖等种床整备工作的核心部件，如图 3 所示，种床整备单元组主要由主动单体、从动单体、链条、刀轴、刀齿和变速箱等组成。种床整备装置共包含 4 个种床整备单元组，可同时完成 4 个大垄的种床整备工作。

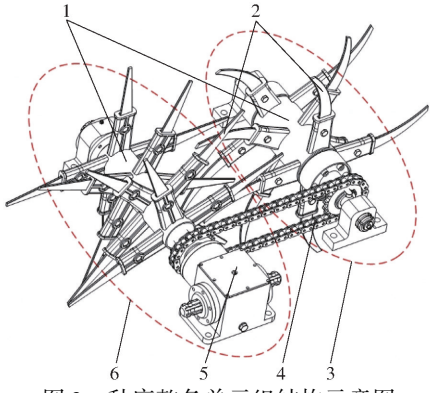
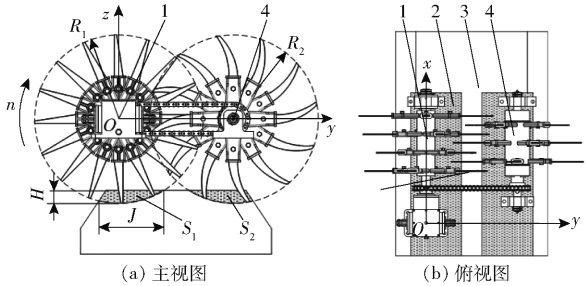


图 3　种床整备单元组结构示意图

Fig. 3　Schematic of seed bed preparation unit group structure

1. 刀轴　2. 刀齿　3. 从动单体　4. 链条　5. 变速箱　6. 主动单体

种床整备单元组工作情况如图 4 所示，以主动单体变速箱中心为原点建立 $Oxyz$ 空间直角坐标系。R_1 为主动单体刀齿轨迹线半径，R_2 为从动单体刀齿轨迹线半径，H 为刀齿最大入土深度，J 为主动单体的清秸宽度，S_1 为主动单体工作区域，S_2 为从动单体工作区域。工作时，种床整备单元组中的主动单体和从动单体随机具以作业速度 v 沿 x 轴正方向前进的同时，绕各自刀轴的中心轴以转速 n 顺时针匀速旋转。根据前期试验确定种床整备单元组刀轴转速(以下简称刀轴转速)为 400～600 r/min，作业速度不超过 7.2 km/h。根茬清除率随着种床整备刀齿入土深度(以下简称入土深度)增加而增加，当达到 50 mm 后根茬清除率基本保持不变[21]，为减小动土量并提高工作效率确定入土深度为 30～50 mm。



(a) 主视图　(b) 俯视图

图 4　种床整备单元组工作示意图

Fig. 4　Working diagrams of seed bed preparation unit group

1. 主动单体　2. 种床　3. 原茬地　4. 从动单体

由图 4 可知，种床整备单元组的工作区域为刀齿轨迹线与垄体轮廓线相交所围成的区域，围成主动单体工作区域的各曲线方程为

$$\begin{cases} y_1^2 + z_1^2 = R_1^2 \\ z_2 = 1.5y_2 + R_1 - H - 75 \\ z_3 = R_1 - H \end{cases} \quad (1)$$

式中 (y_1, z_1)——主动单体刀齿轨迹线方程坐标，mm

(y_2, z_2)——垄体左侧斜面轮廓线方程坐标，mm

z_3——垄顶轮廓线方程坐标，mm

刀轴轴心距垄面距离为 280 mm，当入土深度为 50 mm 时，由式(1)可得主动单体的刀齿轨迹线与垄体斜面相交点的 y 轴坐标为

$$e = 94.62 - 0.153\,84\sqrt{13R_1^2 - 1.68 \times 10^5} \quad (2)$$

式中 e——主动单体的刀齿轨迹线与垄体斜面交点 y 轴坐标，mm

主动单体的清秸宽度计算式为

$$J = e + \sqrt{R_1^2 - 280^2} \quad (3)$$

主动单体的土壤扰动面积计算式为

$$S = \int_e^{50} \left(\sqrt{R_1^2 - y^2} - 1.5y - 205\right) \mathrm{d}y + \int_{50}^{\sqrt{R_1^2 - 280^2}} \left(\sqrt{R_1^2 - y^2} - 280\right) \mathrm{d}y \quad (4)$$

式中 S——主动单体的土壤扰动面积，mm^2

从动单体与主动单体的清秸宽度和土壤扰动面积相同，为保证拖拉机后方播种机开沟器、覆土镇压器等部件不堵塞，要求 yOz 面内的主动单体和从动单体清秸宽度皆大于 170 mm[22]。由式(3)可得，刀齿轨迹线半径大于 300.87 mm。主动单体与从动单体轴距为 450 mm，刀轴外表面之间最小距离为 345 mm，为避免发生干涉刀齿轨迹线半径需小于 345 mm。综合考虑种床整备单元组工作质量和结构尺寸，选取刀齿轨迹线半径为 330 mm。由式(2)、(3)得主动单体的清秸宽度为 251.86 mm，满足播种机部件不堵塞的清秸宽度要求。由式(2)、(4)得主动单体的土壤扰动面积为 8 986.56 mm^2，实地测量每个大垄的横截面积为 79 526.88 mm^2，则每个大垄的土壤扰动率为 22.60%，满足实际生产作业要求[21]。

刀齿采用螺旋线方式排布在刀轴外圆周表面上，每个刀轴上排布有 3 或 4 排刀齿，每排刀齿均为 4 把周向均布，主动单体与从动单体上刀齿的相位分布如图 5 所示。

2.2 前悬挂机构设计

前悬挂机构是连接种床整备装置与拖拉机的关键部件，以约翰迪尔 7830 型拖拉机为例，根据其车身结构、种床整备装置悬挂架尺寸、GB/T 10916—2003 对前悬挂机构相关要求完成前悬挂机构具体结构设计。如图 6 所示，前悬挂机构主要由下拉杆、提升杆、液压缸、上拉杆、侧拉杆、提升臂、悬挂机架、连接梁等部分组成。

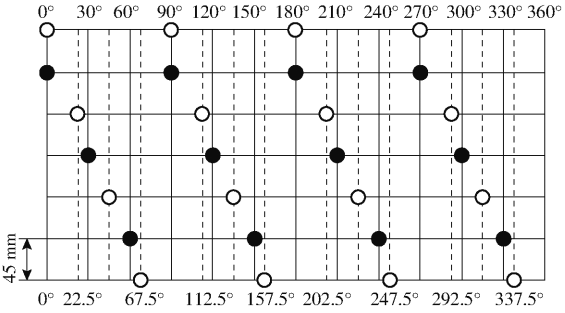


图 5 刀齿相位分布图

Fig. 5 Blade phase distribution diagram

注：图中●为主动(从动)单体刀齿安装位置；○为从动(主动)单体刀齿安装位置。

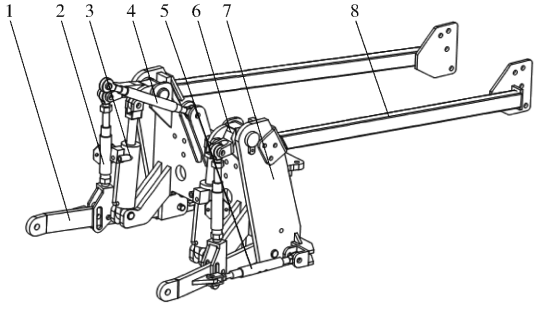


图 6 前悬挂机构结构图

Fig. 6 Structure diagram of front suspension

1. 下拉杆 2. 提升杆 3. 液压缸 4. 上拉杆 5. 侧拉杆 6. 提升臂 7. 悬挂机架 8. 连接梁

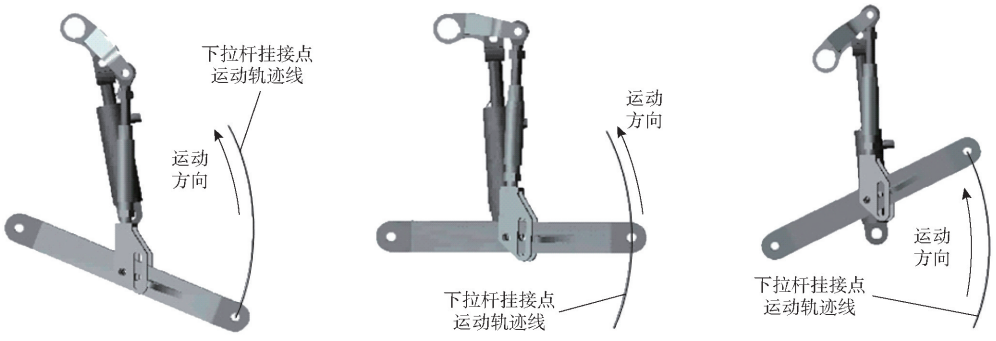
使用时利用螺栓将悬挂机架和连接板与拖拉机固装，上、下拉杆通过销轴与种床整备装置的悬挂架连接。种床整备装置处于运输状态时，液压缸活塞伸出带动提升臂绕轴转动，提升臂通过提升杆带动下拉杆向上提升，提升到指定高度后可将液压油锁死保持种床整备装置运输高度不变；种床整备装置处于工作状态时，液压缸进出油口皆连接液压油箱，使下拉杆自由浮动仿形。根据种床整备装置提升要求，液压缸采用活塞杆向上布置，液压缸行程为 180 mm。

如图 7 所示，将前悬挂机构模型简化后导入 ADAMS 软件中进行运动仿真分析，根据运动分析确定液压缸行程范围内前悬挂机构下拉杆与农具连接处的行程范围为 0 ~ 580 mm，种床整备装置离地间隙调节范围为 100 ~ 730 mm。提升速比是指悬挂轴的垂直上升速度与液压缸活塞运动速度的比值[23]，前悬挂机构提升速比为 3.2。

3 液压系统设计

3.1 方案设计

种床整备装置内部传动系统如图 8 所示。以左



(a) 下拉杆最低位置　(b) 下拉杆水平位置　(c) 下拉杆最高位置

图 7　前悬挂机构运动仿真图

Fig. 7　Motion simulation diagrams of front suspension

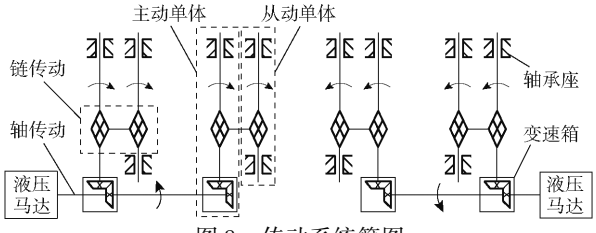


图 8　传动系统简图

Fig. 8　Schematic of transmission system

半部分为例,工作时液压马达通过轴传动将动力输入到 2 个变速箱内,变速箱经过换向后驱动主动单体刀轴转动,同时主动单体通过链传动将动力传输至从动单体,4 个种床整备单元组同时进行种床整备工作。

根据种床整备装置工作情况和拖拉机前悬挂机构使用要求设计的液压系统原理图如图 9 所示[24-25]。液压系统包含液压悬挂系统和液压驱动系统两部分,其中液压悬挂系统两液压缸并联,液压驱动系统两液压马达并联。液压系统工作时,电磁溢流阀通电开启溢流,拖拉机动力输出轴带动液压泵转动,从油箱吸入的液压油通过单向阀、调速阀 5 进入三位四通电液换向阀。当电液换向阀双侧不通电时,液压油从电液换向阀中位直接返回油箱,液压马达和液压缸无动作。当电液换向阀右侧通电时,液压油从电液换向阀经电磁球阀、调速阀 7、分流集流阀进入液压缸无杆腔,推动活塞伸出完成前悬挂机构下拉杆提升动作。此时如果电磁溢流阀不通电,液压缸处于浮动状态,种床整备装置在液压缸浮动状态下靠自重下降。在液压缸活塞运动过程中如果电磁球阀通电则切断液压缸进油,使液压缸活塞伸出长度保持不变,种床整备装置提升高度恒定。当电液换向阀左侧、电磁溢流阀通电时,液压油从电液换向阀左侧经分流阀进入液压马达,液压马达带动种床整备单元组刀轴旋转完成种床整备工作。针对不同的作业环境,可以通过调节调速阀 5、7 控制液压马达转速和液压缸活塞伸出速度。

结合执行元件工作载荷、设备安装空间、元件成

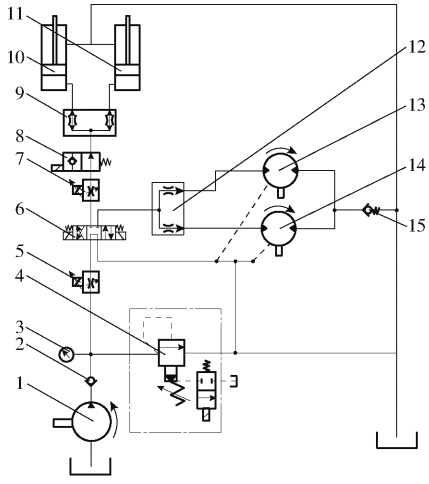


图 9　液压系统原理图

Fig. 9　Schematic of hydraulic system

1. 液压泵　2. 单向阀　3. 液压表　4. 电磁溢流阀　5、7. 调速阀　6. 电液换向阀　8. 电磁球阀　9. 分流集流阀　10、11. 液压缸　12. 分流阀　13、14. 液压马达　15. 背压阀

本等因素综合考虑选取系统工作压力为 25 MPa。由机械设计手册可知,当工作压力大于 20 MPa 时,活塞杆直径是液压缸内径的 71%,液压缸内径计算式为

$$D_W = \sqrt{\frac{4F_W}{\pi\eta_1(p_1 - 0.5p_2)}} \tag{5}$$

式中　D_W——液压缸内径,mm

F_W——活塞受到的有效负载,N

p_1——液压缸工作腔压力,MPa

p_2——液压缸回油腔背压力,MPa

η_1——液压缸效率

液压马达排量计算式为

$$q_m = \frac{2\pi M_m}{\eta_2 \Delta p_m} \tag{6}$$

式中　q_m——液压马达排量,mL/r

M_m——液压马达扭矩,N·m

Δp_m——液压马达压力差,MPa

η_2——液压马达机械效率

系统方案设计为一个液压马达驱动 2 个种床整

备单元组,则液压马达扭矩计算式为

$$M_m = 19\ 100\frac{P_0}{n} \tag{7}$$

式中 P_0——每个种床整备单元组工作时刀轴消耗旋转功率上限,kW

由于种床整备工作和种床整备装置全速提升不同时进行,且液压马达流量远大于液压缸流量,则液压泵流量计算式为

$$Q_p = \frac{2q_m n_m \eta_4}{\eta_3} \times 10^{-3} \tag{8}$$

式中 Q_p——液压泵流量,L/min

n_m——液压马达转速,r/min

η_3——液压马达容积效率

η_4——系统泄漏和溢流阀系数

根据前悬挂机构极限位置液压缸受力情况可知,单个液压缸最大推力设计下限为 68.35 kN,取液压缸背压为 0.2 MPa,效率为 0.85,经式(5)确定液压缸内径 80 mm,活塞杆直径 56 mm。由相关研究结果可知,每个种床整备单元组工作时刀轴消耗旋转功率上限 P_0 为 10 kW[26]。液压马达机械效率为 0.92,容积效率为 0.94,在背压为 0.2 MPa、转速为 600 r/min 时,由式(6)、(7)可得液压马达排量为 100 mL/r。系统泄漏和溢流阀系数为 1.1,由式(8)可得液压泵排量为 140 mL/r。

3.2 仿真分析

根据液压系统原理图在 AMESim 中建立仿真模型[27-28],如图 10 所示。模型建立完成后为各元件选择合适的子模型,并根据元件样本资料、机械设计手册和作业条件为各仿真模型添加参数,主要参数如表 2 所示。

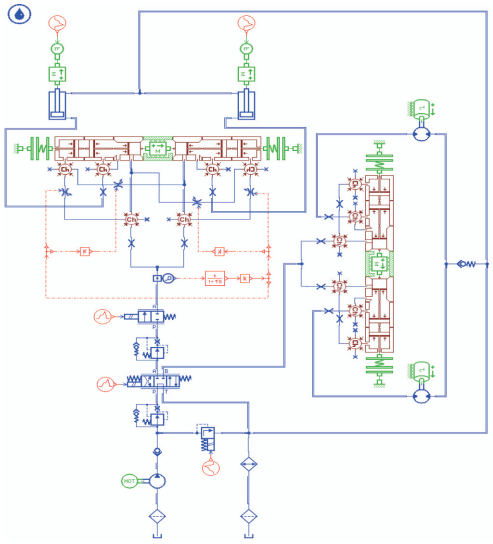


图 10 液压系统仿真模型图

Fig. 10 Hydraulic system simulation model diagram

仿真时间为 0 ~ 16 s,通信间隔为 0.01 s,电液

表 2 液压元件主要参数

Tab. 2 Main parameters of hydraulic components

参数	数值
泵排量/(mL·r^{-1})	140
泵额定转速/(r·min^{-1})	1 000
调速阀 5 流量/(L·min^{-1})	140
调速阀 7 流量/(L·min^{-1})	20
换向阀特征流量/(L·min^{-1})	140
球阀特征流量/(L·min^{-1})	20
溢流阀卸荷压力/MPa	25
液压缸活塞直径/mm	80
液压缸活塞杆直径/mm	56
液压缸行程/mm	180
分流集流阀活塞直径/mm	10
分流阀活塞直径/mm	20
液压马达额定转速/(r·min^{-1})	1 000
液压马达排量/(mL·r^{-1})	100

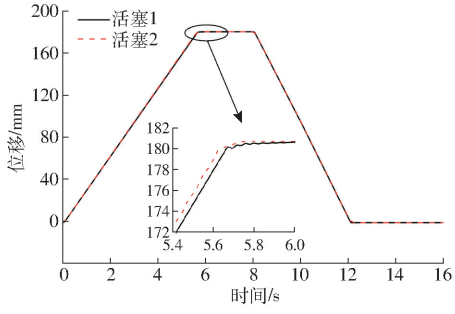


图 11 液压缸活塞位移变化曲线

Fig. 11 Displacement curves of hydraulic cylinder piston

换向阀在 0 ~ 10 s 内右侧通电,向液压悬挂系统供油,在 10 ~ 15 s 内左侧通电,向液压驱动系统供油,在 15 ~ 16 s 两侧均不通电,液压油直接返回油箱。为真实反映前悬挂机构在提升种床整备装置过程中两侧液压缸受力不均匀的情况,设置两活塞负载差值为 1 000 kg,两活塞位移变化曲线如图 11 所示。

由图 11 可知,在 0 ~ 5.72 s 内,两液压缸活塞匀速由 0 mm 伸出至 180 mm,5.72 ~ 8.00 s 内活塞位置保持稳定,8.00 ~ 12.00 s 内活塞处于浮动状态,在种床整备装置重力的作用下匀速缩回。在两液压缸承受负载相差 1 000 kg 时,活塞位移差随着时间增加而增加,最大位移差发生在 5.62 s 处,差值为 1.17 mm。在两侧负载差异较大的情况下液压缸活塞运动平稳,位置保持稳定,同步性能好,满足种床整备装置在播种作业和运输工况时的技术要求。

液压驱动系统中 2 个液压马达的转速和扭矩变化曲线如图 12 所示,在 10 s 时液压马达开始转动,在约 1 s 后转速和扭矩达到稳定状态。稳定工作时两液压马达转速差为 3.58 r/min,在转速 600 r/min 时每个液压马达能提供 350 N·m 的扭矩,满足工作需要。

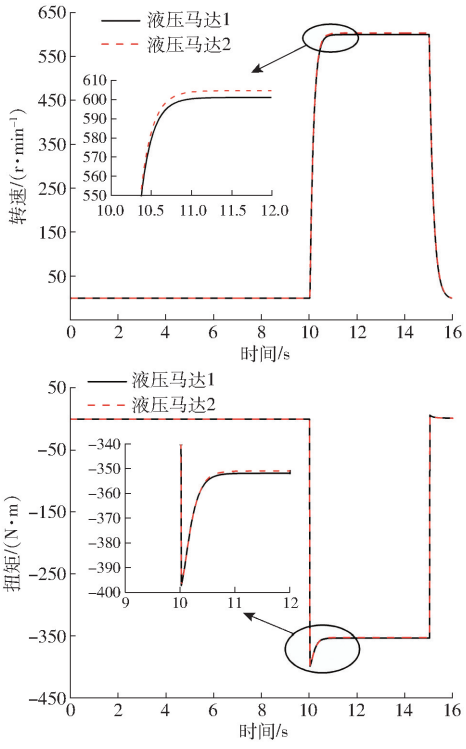


图 12　液压马达转速和扭矩变化曲线

Fig. 12　Speed and torque curves of hydraulic motors



(a) 样机田间试验

(b) 作业效果

图 13　田间试验

Fig. 13　Field experiment

4　参数优化试验

4.1　试验条件

试验于 2020 年 10 月 15—20 日在黑龙江省九三管理局尖山农场实施，依据 DG/T 028—2019《免耕播种机》和 GB/T 20865—2017《免(少)耕施肥播种机》实施本次试验。选取试验地长度 100 m，其中测试区 60 m，两端预备区 20 m，试验地块为机收后玉米原茬地，如图 13 所示。前茬作物种植模式为 1.1 m 大垄宽窄行，深度 0～10 cm 土壤平均硬度为 24.35 kg/cm^2，土壤平均含水率为 20.31%，秸秆含水率为 32.31%，秸秆覆盖量为 2.15 kg/m^2，玉米根茬平均高度 210 mm。试验仪器设备包括：约翰迪尔 7830 型拖拉机、前置式种床整备装置、TZS－1 型土壤湿度计、PV6.08 土壤硬度计、ACS－30 电子秤、自制转速测量仪、卷尺、数码相机等。

4.2　试验方法

采用三因素三水平正交试验方法[29]，应用 $L_9(3^4)$ 正交表设计试验，以作业速度 A、刀轴转速 B、入土深度 C 为试验因素，以清秸率 Y_1、覆秸均匀度 Y_2、每个种床整备单元组刀轴旋转功耗 Y_3(以下简称当量功耗)为评价指标，共实施 9 组试验，每组试验重复 3 次取平均值。

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行分析。参照 2BMFJ 系列免耕精量播种机和农场现有播种机作业速度技术参数，并结合前期试验选取作业速度为 5.4～7.2 km/h、刀轴转速为 400～600 r/min[21]，由前文分析确定入土深度为 30～50 mm。通过调节液压驱动系统的调速阀 5 和拖拉机的动力输出轴转速控制刀轴转速，通过调节地轮高度控制入土深度。试验因素水平如表 3 所示。

表 3　试验因素水平

Tab. 3　Factors and levels of experiment

水平	因素		
	作业速度/(km·h^{-1})	刀轴转速/(r·min^{-1})	入土深度/mm
1	5.4	400	30
2	6.3	500	40
3	7.2	600	50

试验评价指标测量方法如下：

(1)清秸率

清秸率是指作业幅宽内种床整备单元组工作区域作业前后全部秸秆质量的比值[30]，在完成种床整备区域内采用五点法确定采样点，根据大垄宽窄行种植模式垄台平均宽度确定每个采样点的范围为 1 m×0.5 m。

(2)覆秸均匀度

参照 NY/T 500—2015《秸秆粉碎还田机作业质量》制定了覆秸均匀度指标。测定方法：秸秆覆盖区域利用五点法选取 5 个测点(1 m×1 m)，所选各测点秸秆覆盖质量均值和极差的差值与各测点秸秆覆盖质量均值的比值即为覆秸均匀度。

(3)当量功耗

当量功耗是每个种床整备单元组刀轴旋转作业消耗的功率,参照 T/CAMA 14.3—2020《农业机械作业载荷检测技术规范 第 3 部分:轮式拖拉机(组)》进行测定,通过液压马达的转速和工作压力差计算得出,当量功耗计算式为

$$Y=\frac{\Delta p_m q_m n_m \eta_2}{1.2\times10^5} \tag{9}$$

式中 Y——当量功耗,kW

4.3 试验结果与分析

试验方案与结果如表 4 所示,方差、极差分析如表 5 所示。

表 4 试验方案与结果

Tab.4 Experimental scheme and results

序号	因素			清秸率/%	覆秸均匀度/%	当量功耗/kW
	A	B	C			
1	1	1	1	92.57	90.40	4.80
2	1	2	2	95.39	91.97	6.30
3	1	3	3	96.91	93.79	8.10
4	2	1	2	92.33	89.63	6.12
5	2	2	3	94.17	90.79	7.66
6	2	3	1	92.32	93.61	7.00
7	3	1	3	90.68	88.43	8.20
8	3	2	1	89.60	90.68	7.26
9	3	3	2	92.28	92.56	8.70

表 5 方差、极差分析结果

Tab.5 Results of variance and range analysis

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	k_1	k_2	k_3	R	优化水平	优化组合
清秸率	A	25.31	2	12.65	355.36	0.002 8 **	94.96	92.94	90.85	4.11	A_1	$A_1B_3C_3$
	B	5.94	2	2.97	83.33	0.011 9 *	91.86	93.05	93.84	1.98	B_3	
	C	9.59	2	4.79	134.61	0.007 4 **	91.50	93.33	93.92	2.42	C_3	
	残差	0.071	2	0.036								
	总和	40.90	8									
覆秸均匀度	A	3.36	2	1.68	151.40	0.006 6 **	92.05	91.34	90.56	1.49	A_1	$A_1B_3C_1$
	B	22.18	2	11.09	1 000.04	0.001 0 **	89.49	91.15	93.32	3.83	B_3	
	C	0.50	2	0.25	22.41	0.042 7 *	91.56	91.39	91.00	0.56	C_1	
	残差	0.022	2	0.011								
	总和	26.06	8									
当量功耗	A	4.28	2	2.14	176.38	0.005 6 **	6.40	6.93	8.05	1.65	A_1	$A_1B_1C_1$
	B	3.66	2	1.83	150.96	0.006 6 **	6.37	7.07	7.93	1.56	B_1	
	C	4.04	2	2.02	166.30	0.006 0 **	6.35	7.04	7.99	1.63	C_1	
	残差	0.024	2	0.012								
	总和	12.00	8									

注:* 表示差异显著($0.01<P<0.05$),** 表示差异极显著($P<0.01$)。

由表 5 可知,作业速度和入土深度对清秸率具有极显著影响,刀轴转速对清秸率具有显著影响,影响由大到小依次为作业速度、入土深度、刀轴转速,优化组合为 $A_1B_3C_3$;作业速度和刀轴转速对覆秸均匀度具有极显著影响,入土深度对覆秸均匀度具有显著影响,影响由大到小依次为刀轴转速、作业速度、入土深度,优化组合为 $A_1B_3C_1$;作业速度、刀轴转速、入土深度对当量功耗均具有极显著影响,影响由大到小依次为作业速度、入土深度、刀轴转速,优化组合为 $A_1B_1C_1$。

4.4 参数优化与验证试验

种床清秸率达到 90% 以上可有效解决播种时发生秸秆残茬造成的堵塞问题[31]。在种床秸秆残茬不影响播种质量前提下,以作业速度最大、覆秸均匀度最高、当量功耗最小为优化原则,综合考虑各因素对清秸率、覆秸均匀度和当量功耗的影响,进行优化组合分析。如表 5 所示,比较 3 个指标的优化结果,A_1 的覆秸均匀度高于 A_3,当量功耗小于 A_3,但考虑到 A_3 作业速度最大,且清秸率大于 90%,播种季节以抢播抢种抢农时为第一要务,因此取 A_3;因素 B 对覆秸均匀度具有极显著影响,B_3 的覆秸均匀度显著高于 B_1,故取 B_3;因素 C 对清秸率和当量功耗具有极显著影响,C_3 的当量功耗显著高于 C_1,故取 C_1。确定优化参数组合为 $A_3B_3C_1$,即作业速度 7.2 km/h、刀轴转速 600 r/min、入土深度 30 mm,此条件下清秸率为 90.35%,覆秸均匀度为 92.81%,当量功耗为 8.09 kW。

在该优化参数组合条件下,2020 年 10 月 25 日在尖山农场进行验证试验,结果如表 6 所示。统计分析结果显示:清秸率为 91.03%,覆秸均匀度为 92.61%,当量功耗为 7.96 kW。各指标值与优化结果相对误差最大为 1.63%,优化结果真实可信。

表 6　验证试验结果

Tab. 6　Verification experimental results

序号	清秸率/%	覆秸均匀度/%	当量功耗/kW
1	90.54	91.76	7.84
2	91.73	93.27	8.06
3	91.28	92.96	7.92
4	90.57	93.51	8.34
5	91.05	91.57	7.62
平均值	91.03	92.61	7.96

5　结论

(1)设计了一种适用于玉米大豆 1.1 m 大垄轮作宽窄行种植模式的前置式原茬地种床整备装置，其液压悬挂系统和液压驱动系统各执行元件的同步性能、转速和扭矩均满足作业技术要求，前置式原茬地种床整备装置与播种机前后配置构成原茬地免耕精播覆秸作业机组，能够满足玉米原茬地播种秸秆覆盖还田生产农艺要求。

(2)各因素对清秸率影响由大到小为作业速度、种床整备刀齿入土深度、种床整备单元组刀轴转速；对覆秸均匀度影响由大到小为种床整备单元组刀轴转速、作业速度、种床整备刀齿入土深度；对每个种床整备单元组刀轴旋转功耗影响由大到小为作业速度、种床整备刀齿入土深度、种床整备单元组刀轴转速。

(3)在土壤硬度 24.35 kg/cm^2、含水率 20.31%，秸秆含水率 32.31%、覆盖量 2.15 kg/m^2，玉米根茬平均高度 210 mm 的 1.1 m 玉米大垄宽窄行原茬地上，前置式原茬地种床整备装置参数组合为作业速度 7.2 km/h、种床整备单元组刀轴转速 600 r/min、种床整备刀齿入土深度 30 mm 时，清秸率为 91.03%，覆秸均匀度为 92.61%，每个种床整备单元组刀轴旋转功耗为 7.96 kW，性能满足生产农艺技术要求。

参　考　文　献

[1] 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? file_no=20180401&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)

[2] YE Rongzhong, PARAJULI B, DUCEY T F, et al. Cover cropping increased phosphorus stocks in surface sandy ultisols under long-term conservation and conventional tillage[J]. Agronomy Journal, 2020, 112(4): 3163－3173.

[3] SUN Lei, LI Jun, WANG Qian, et al. The effects of eight years of conservation tillage on the soil physicochemical properties and bacterial communities in a rain-fed agroecosystem of the Loess Plateau, China[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(16): 2475－2489.

[4] 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)

[5] 王碧胜，蔡典雄，武雪萍，等. 长期保护性耕作对土壤有机碳和玉米产量及水分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2015，21(6)：1455－1464.
WANG Bisheng, CAI Dianxiong, WU Xueping, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil organic carbon, maize yield and water utilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(6): 1455－1464. (in Chinese)

[6] WANG Jun, FU Xin, SAINJU U M, et al. Soil carbon fractions in response to straw mulching in the Loess Plateau of China[J]. Biology & Fertility of Soils, 2018, 54(4): 423－436.

[7] 张翼夫，王庆杰，胡红，等. 华北玉米秸秆覆盖对砂土、壤土水土保持效应的影响[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(5)：138－145，154.
ZHANG Yifu, WANG Qingjie, HU Hong, et al. Effect of maize straw mulching on water and soil conservation in sandy soil and loam soil of North China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 138－145, 154. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160519&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.019. (in Chinese)

[8] 杨志强. 大垄双行播种玉米机械化生产试验研究[J]. 农机化研究，2018，40(7)：157－161.
YANG Zhiqiang. Experimental research of the corn mechanized production based on the big ridge double rows seeding[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(7): 157－161. (in Chinese)

[9] 王庆杰，李洪文，何进，等. 大垄宽窄行免耕种植对土壤水分和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报，2010，26(8)：39－43.
WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Effects of wide-ridge and narrow-row no-till cultivation on soil water and maize yield [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 39－43. (in Chinese)

[10] 牛世伟，安景文，刘慧屿，等. 大垄双行疏密种植对玉米冠层结构及产量影响的研究[J]. 玉米科学，2014，22(5)：98－103.
NIU Shiwei, AN Jingwen, LIU Huiyu, et al. Effect of big ridge double line spacing plantation on canopy structure and yield of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2014, 22(5): 98－103. (in Chinese)

[11] 张军昌，闫小丽，薛少平，等. 秸秆粉碎覆盖玉米免耕施肥播种机设计[J/OL]. 农业机械学报，2012，43(12)：51－55.
ZHANG Junchang, YAN Xiaoli, XUE Shaoping, et al. Design of no-tillage maize planter with straw smashing and fertilizing[J/

OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(12):51 - 55. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20121210&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.010. (in Chinese)

[12] 何进,李洪文,王庆杰,等. 动力甩刀式小麦固定垄免耕播种机[J]. 农业机械学报,2011,42(10):51 - 56.
HE Jin,LI Hongwen,WANG Qingjie,et al. Powered hammering blade no-till wheat seeder for permanent raised beds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(10):51 - 56. (in Chinese)

[13] 林静,李宝筏,李宏哲. 阿基米德螺线型破茬开沟和切拨防堵装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(17):10 - 19.
LIN Jing,LI Baofa,LI Hongzhe. Design and experiment of archimedes spiral type stubble breaking ditching device and stubble breaking anti blocking device[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(17):10 - 19. (in Chinese)

[14] SHARIPOV G M,PARAFOROS D S,PULATOV A S,et al. Dynamic performance of a no-till seeding assembly[J]. Biosystems Engineering,2017,158:64 - 75.

[15] MATIN M A,FIELKE J M,DESBIOLLES J M A. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrows using three designs of rotary blade[J]. Biosystems Engineering,2015,129:329 - 340.

[16] 赵淑红,王加一,杨超,等. 保护性耕作破茬碎土刀设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):57 - 68.
ZHAO Shuhong,WANG Jiayi,YANG Chao,et al. Design and experiment of stubble chopper for interaction with subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9):57 - 68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190907&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.007. (in Chinese)

[17] 刘艳芬,李宝筏,林静. 轻量化玉米垄作免耕播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):60 - 69.
LIU Yanfen,LI Baofa,LIN Jing. Design and experiment on lightweight maize ridge planting no-tillage planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11): 60 - 69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171108&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.008. (in Chinese)

[18] 侯守印,陈海涛,邹震,等. 原茬地种床整备侧向滑切清秸刀齿设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(6):41 - 51,217.
HOU Shouyin,CHEN Haitao,ZOU Zhen,et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(6):41 - 51,217. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190605&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.005. (in Chinese)

[19] 陈海涛,侯磊,侯守印,等. 大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置设计与优化试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(8):59 - 67.
CHEN Haitao,HOU Lei,HOU Shouyin,et al. Design and optimization experiment of anti-blocking mechanism of no-tillage planter for grand ridge with raw corn stubble[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8):59 - 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180807&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.007. (in Chinese)

[20] 陈海涛,查韶辉,顿国强,等. 2BMFJ 系列免耕精量播种机清秸装置优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):96 - 102.
CHEN Haitao,ZHA Shaohui,DUN Guoqiang,et al. Optimization and experiment of cleaning device of 2BMFJ type no-till precision planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):96 - 102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160714&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.014. (in Chinese)

[21] 侯守印,陈海涛,邹震,等. 玉米原茬地侧向清茬刀设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(2):59 - 69.
HOU Shouyin,CHEN Haitao,ZOU Zhen,et al. Design and test of lateral stubble cleaning blade for corn stubble field[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(2):59 - 69. (in Chinese)

[22] 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等. 仿形滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(4):16 - 24.
JIA Honglei,ZHENG Jiaxin,YUAN Hongfang,et al. Design and experiment of profiling sliding-knife opener[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(4):16 - 24. (in Chinese)

[23] 房雷. 大马力轮式拖拉机机组匹配中悬挂机构的参数化模型研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2012.
FANG Lei. Parameterization model research of suspension in high-powered tractor unit matching[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology,2012. (in Chinese)

[24] 张华,郑加强. 4WD 型农药喷雾机液压四驱底盘直行同步控制方法比较及验证[J]. 农业工程学报,2016,32(23):43 - 50.
ZHANG Hua,ZHENG Jiaqiang. Comparison of straight line driving synchronous control methods and validation of 4WD sprayer chassis with hydraulic power[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(23):43 - 50. (in Chinese)

[25] 李壮云. 液压元件与系统[M]. 北京:机械工业出版社,2011.

[26] 顿国强,陈海涛,李昂,等. 刀齿排布旋向对免耕覆秸精播机清秸单体性能的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(12):48 - 56.
DUN Guoqiang,CHEN Haitao,LI Ang,et al. Effect of rotation direction of knife teeth configuration on clearing straw unit performance for no-tillage and straw mulching precision seeder[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(12):48 - 56. (in Chinese)

(下转第 73 页)