

秸秆粉碎还田与整地复式作业机连接装置设计与试验

孙妮娜¹ 王晓燕²

(1. 鲁东大学交通学院, 烟台 264025; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对东北稻区秸秆粉碎质量不达标影响后续整地质量, 机具下地作业次数多土壤压实严重的问题, 设计一种连接装置可连接秸秆粉碎还田机与整地机具, 一次下地实现秸秆粉碎还田与整地的复式作业。综合考虑秸秆粉碎还田与犁耕之间的交互作用与匹配性, 从横垂面、纵垂面、水平面 3 个运动平面对连接装置进行理论分析, 并通过仿真对连接装置进行稳定性分析。通过理论分析, 进行连接装置横垂面幅宽匹配性、纵垂面作业位置匹配性、水平面动力学匹配性研究; 根据理论分析得的连接参数, 进行连接装置结构设计; 通过 ANSYS Workbench 进行关键连接装置的静力学分析及动态分析, 设计的装置满足强度要求及运输状态的稳定性要求。复式作业与分段作业的田间试验表明, 复式作业能够达到犁耕的工作稳定性要求, 耕深平均值为 17.3 cm, 耕深稳定性系数为 91.2%, 耕宽平均值为 119.2 cm, 耕宽稳定性系数为 93.6%; 复式作业植被覆盖率为 95.7%, 分段作业植被覆盖率为 98.3%, 二者无显著性差异, 且复式作业油耗比分段作业少, 可减少油耗 3.15 kg/hm²。

关键词: 复式作业机; 连接装置; 秸秆粉碎还田; 整地; 匹配性

中图分类号: S222.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)02-0015-10 **OSID:** 

Design and Experiment of Connection Device of Duplex Straw Crushing Returning and Soil Preparation Machine

SUN Ni'na¹ WANG Xiaoyan²

(1. College of Transportation, Ludong University, Yantai 264025, China
2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In the rice planting area of Northeast China, the large amount of rice straw with low moisture content was tough to crush, and the poor quality of straw crushing and scattering would seriously affect the quality of subsequent soil preparation. In order to meet the demand of soil preparation for straw returning and reduce the number of machine tools under the ground operation, the connection device which could combine the straw crushing returning and soil preparation were designed. According to the characteristics of the duplex operation machine, the interaction and matching between straw crushing and ploughing were considered in the design process. The connection device were analyzed theoretically from three motion planes: horizontal vertical surface, longitudinal vertical surface and level surface, and the reliability of the connection device were analyzed by simulation. Through theoretical analysis, the width matching of horizontal vertical surface, the position matching of longitudinal vertical surface and the dynamics matching of level surface were studied. According to the connection parameters obtained from theoretical analysis, the structure of the connection device was designed. The static analysis and dynamic analysis of the key connecting device were carried out by ANSYS Workbench, and the device were designed to meet the requirements of strength and reliability in the transportation state. The field experiments of duplex operation and section operation showed that the duplex operation machine could achieve the working stability of the plough. The experiments showed that the average ploughing depth was 17.3 cm, the stability of ploughing depth was 91.2%, the average ploughing width was 119.2 cm, and the stability of ploughing width was 93.6%. The vegetation coverage rate of duplex operation was 95.7%, and that of section operation was 98.3%, which was no significant difference between them. Moreover, the fuel consumption of duplex operation was less than that of section operation, and the fuel consumption could be saved by 3.15 kg/hm². The research result can provide reference for the development and interactivity

design of connection device of duplex operation machine.

Key words: duplex operation machine; connection device; straw crushing returning; soil preparation; matching

0 引言

东北稻区有“黑色越冬”的传统,翻耕是秋整地的重要方式^[1-2],其作业质量直接影响土壤肥力及后续春季整地作业质量。在秸秆还田的情况下,秸秆粉碎抛撒质量差会严重影响后续整地、插秧质量及秸秆腐解速度,导致整地时机具堵塞、插秧前秸秆漂浮、插秧时秧苗漂秧等问题^[3-4]。因此,为了提高秸秆还田质量,并减少机具下地作业次数,设计一种集秸秆粉碎还田、犁耕等多道工序的秸秆粉碎还田整地复式作业机(简称复式作业机)具有重要意义。

目前,国内外学者针对复式整地机械进行了一系列研究,机具结构多采用一体机,根据农艺需求,可实现秸秆粉碎、旋耕、深松、掩埋等多项作业^[5-7]。国外部分学者根据整地需求,将多种不同功能的整地装置组合,与单独机具作业相比可提高耕作质量、降低系统功耗^[8-9]。国内部分学者根据秸秆还田需求,将秸秆粉碎装置与整地装置组合,可实现秸秆还田、整地等多项功能^[10-12]。这类机具可实现一机多用、减少机具下地作业次数,但考虑机具之间的交互性较少。

国内外部分学者针对组合机具各装置之间的交互性,展开了相关研究。USABORISUT等^[13]为了降低田间耕作功耗,进行深松机和旋转耙组合耕作机具与深松机、旋转耙单独作业的田间对比试验,并设计4种连杆结构研究不同几何和运动关系对组合耕作机具总功率的影响,试验表明带连杆IV的组合耕作工具消耗的总功率最少。秦宽等^[14]为了满足稻麦轮作耕作方式的整地需求,综合考虑犁耕与旋耕作业之间的交互性,设计一种集翻耕、旋耕、秸秆粉碎还田等多道工序为一体的犁翻旋耕复式作业耕整机,可一次性整地达到待播状态。

本文针对东北稻区秸秆粉碎质量不达标影响后续整地质量,机具下地作业次数多、土壤压实严重的问题,联合差速锯切式水稻秸秆粉碎还田机(简称秸秆粉碎还田机)^[15]与现有铧式犁,设计一种连接装置可连接秸秆粉碎还田机与整地装置,一次下地实现秸秆粉碎还田与整地的复式作业。通过理论分析确定连接装置的主要结构参数,并通过有限元仿真进行连接装置强度及稳定性分析,以期为东北稻区秸秆还田、防止秸秆堵塞机具、提高秸秆掩埋效

果、减少机具进地作业次数提供技术支撑。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

复式作业机整机结构如图1所示,主要由秸秆粉碎还田机、1L-430型铧式犁、连接装置(连接架、中间悬挂装置、可调拉杆、中间拉杆、支撑架Ⅱ)等组成。铧式犁通过中间悬挂装置、连接架及可调拉杆与秸秆粉碎还田机相连,随着拖拉机前进被拖动,将粉碎的秸秆掩埋入土。中间拉杆和支撑架Ⅱ起到结构稳定的作用,可防止机具运输过程中由于机身过长导致的结构变形;可调拉杆起到控制铧式犁入土深度的作用;连接架与铧式犁下悬挂点相连接,起到控制铧式犁与秸秆粉碎还田机相对高度的作用。

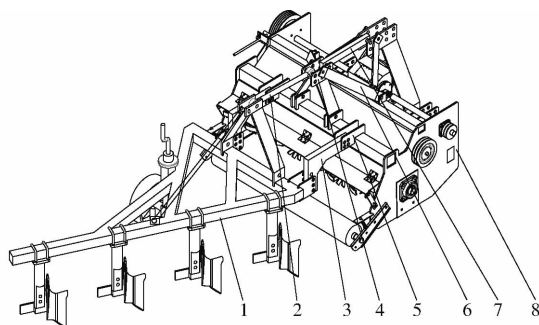


图1 复式作业机整机结构图

Fig. 1 Structure diagram of duplex operation machine

1. 1L-430 型铧式犁 2. 可调拉杆 3. 连接架 4. 中间上悬挂点
5. 中间下悬挂点 6. 支撑架Ⅱ 7. 中间拉杆 8. 秸秆粉碎还田机

1.2 工作原理与结构参数

复式作业机与拖拉机配套作业,拖拉机动力通过变速箱传递给秸秆粉碎还田机。秸秆粉碎还田机对秸秆进行处理,完成秸秆的粉碎、抛撒及镇压作业。同时,秸秆粉碎还田机通过中间悬挂装置、连接架及可调拉杆牵引铧式犁随着拖拉机前进,进而完成秸秆的掩埋作业。

通过复式作业机,一次作业可同时完成秸秆粉碎、抛撒、翻埋等多道工序,耕后达到作物秸秆粉碎抛撒均匀且掩埋效果好的作用。复式作业机与现有先秸秆粉碎抛撒、再犁翻掩埋还田的分段作业相比,其整机结构简单且机具下地作业次数少。复式作业机主要结构参数如表1所示。

2 关键部件设计及参数确定

连接装置可连接秸秆粉碎还田机与铧式犁,一

表 1 复式作业机主要结构参数

Tab.1 Parameters of duplex operation machine

参数	数值
外形尺寸/(mm×mm×mm)	3 910×2 000×1 300
机器质量/kg	1 100
铧式犁耕作深度/cm	17
秸秆粉碎还田机工作幅宽/mm	1 600
复式作业机工作幅宽/mm	1 200
配套动力/kW	≥75
机具前进平均速度/(km·h ⁻¹)	3.6

次下地实现秸秆粉碎还田与整地的复式作业,设计过程中重点考虑秸秆粉碎还田与犁耕的匹配。从横垂面、纵垂面、水平面 3 个运动平面对连接装置进行理论分析,根据理论分析进行连接装置结构设计,并通过 ANSYS 仿真对连接装置进行稳定性分析。

2.1 横垂面幅宽匹配性

通过连接装置设计保证秸秆粉碎还田与犁耕的幅宽匹配,对秸秆粉碎还田与犁耕横垂面幅宽匹配性进行分析。设计幅宽匹配时,秸秆粉碎还田机的工作幅宽需比铧式犁的工作幅宽大,以保证犁翻区域的秸秆均已粉碎抛撒,避免长秸秆缠绕犁体、长秸秆被掩埋难腐解、秸秆在土壤中成团存在等问题。

复式作业机作业时,机具与土壤、秸秆之间的相互作用力较为复杂。现有铧式犁基本采用斜线配置方式且犁向一致,此配置的铧式犁受力复杂,在横向和纵向均受到一定阻力。而秸秆粉碎还田机的粉碎刀在轴向方向按双螺旋线形式排列在粉碎刀辊上,同一平面内两组粉碎刀上、下对称安装,锯盘刀在轴向方向上均布在锯盘刀轴上^[15],使得该还田机在粉碎秸秆时粉碎刀及锯盘刀各自产生的轴向力基本可以相互抵消。因此,为了防止复式作业机因铧式犁在作业过程中受到轴向力而产生跑偏现象,设计整机牵引中心通过秸秆粉碎还田机中心线,即连接装置的牵引中心与秸秆粉碎还田机中心线重合。

横垂面幅宽匹配示意图如图 2 所示。根据前期田间试验可知,秸秆堵塞易发生在犁尖刚入土的区域,所以设计第四犁体犁尖时必须保证犁尖接触区域秸秆较短;该复式作业机可用于水稻收获时不粉碎秸秆的情况,此时秸秆较长,平均长度为 43.5 cm,为避免过长的秸秆缠绕第四犁体犁尖,需预留的横向距离 a 较大。

根据秸秆抛撒运动轨迹及相关田间抛撒试验,确定秸秆抛撒幅宽为 1 600 mm;根据前期翻耕田间试验,选用 1L-430 型铧式犁。经综合分析可得

$$a+4b+c=1\,600 \tag{1}$$

式中 a ——第四犁体犁尖与秸秆粉碎还田机左侧

板的横向距离,取 250 mm

b ——单个犁体的幅宽

c ——第一犁体犁刃末端与秸秆粉碎还田机右侧板的横向距离,取 150 mm

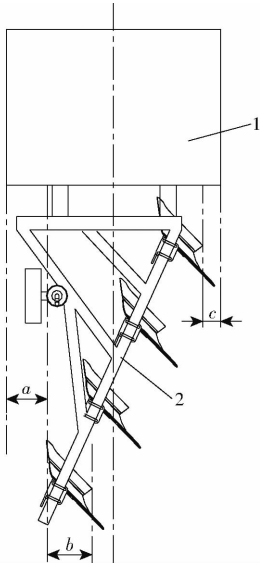


图 2 横垂面幅宽匹配示意图

Fig.2 Schematic of horizontal vertical surface width matching

1. 秸秆粉碎还田机 2. 铧式犁

2.2 纵垂面作业位置匹配性

纵垂面作业位置匹配性包括秸秆抛撒距离与犁耕入土位置匹配性、整机纵垂面耕深稳定性和机具相对高度匹配性。

2.2.1 秸秆抛撒距离与犁耕入土位置匹配性

纵垂面秸秆抛撒轨迹示意图如图 3 所示,其中秸秆粉碎还田机导流板角 θ 可调,可从 DD_1 调至 DD_2 。

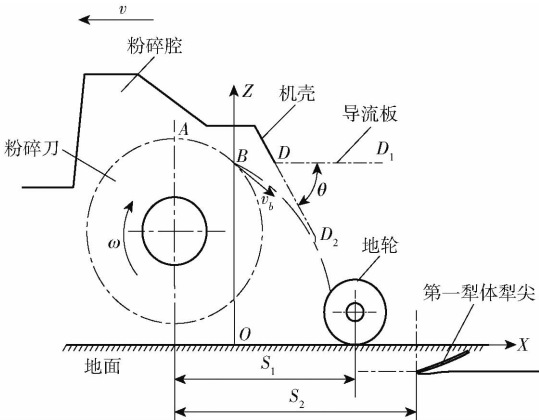


图 3 纵垂面秸秆抛撒轨迹示意图

Fig.3 Schematic of straw throwing trajectory on longitudinal vertical surface

采用抛射体理论对秸秆抛撒过程进行分析,秸秆抛撒过程可分为上抛、平抛和下抛 3 个过程^[16]。从点 A 到点 B 上抛、平抛的秸秆,由于机壳阻挡的

影响,会反弹或降速后再抛撒;从点 B 抛出的秸秆不受机壳影响,主要受导流板角影响,秸秆呈下抛趋势。以点 B 为例进行秸秆抛撒运动学分析,秸秆抛撒在距离 S_1 范围内时,抛撒的秸秆经地轮镇压减少了不平整,为后期整地提供了良好的作业条件;若秸秆抛撒距离超过 S_2 ,则会出现秸秆抛撒到翻耕后地表的现象。

秸秆下抛过程三维空间轨迹示意图如图 4 所示,其中秸秆抛撒初始速度为 v_b , S 为秸秆抛撒距离, S' 为秸秆抛撒幅宽。

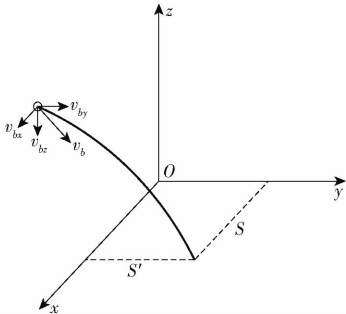


图 4 秸秆下抛过程三维空间轨迹示意图
Fig. 4 Three-dimensional space trajectory of straw tossing process

采用抛射体理论对秸秆的下抛过程进行分析,可得

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} + k \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = 0 \\ \frac{d^2y}{dt^2} + k \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 = 0 \\ \frac{d^2z}{dt^2} - k \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 + g = 0 \end{cases} \quad (2)$$

初始条件为 $t = 0$, 初速度 v_b 在 x 、 y 、 z 方向的初始值分别为 v_{bx} 、 v_{by} 、 v_{bz} , 位置的初始值分别为 x_0 、 y_0 、 z_0 , k 为空气阻力因子。对运动方程式(2)进行二次积分,可得秸秆在 x 、 y 、 z 方向的位置坐标。

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + \frac{1}{k} \ln(1 + kv_{bx}t) \\ y(t) = y_0 + \frac{1}{k} \ln(1 + kv_{by}t) \\ z(t) = z_0 + \frac{1}{k} \ln \frac{2e^{\sqrt{gkt}}}{1 - \sqrt{\frac{k}{g}}v_{bz} + \left(1 + \sqrt{\frac{k}{g}}v_{bz}\right)e^{2\sqrt{gkt}}} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,影响秸秆抛撒特性的主要因素有秸秆抛撒初速度 v_b 、初始位置 (x_0, y_0, z_0) 和初始角,其中抛撒初速度主要与粉碎刀转速有关,抛撒初始位置和角度取决于导流板的空

间位置。

为了减小整机长度,应尽可能减小秸秆粉碎还田机与铧式犁的距离,相应地需减小秸秆后抛距离

S 。通过实际田间试验,导流板与机壳之间调节角 θ 为 10° 时,抛撒的秸秆能够抛撒在地轮前侧(S_1 之内),秸秆抛撒幅宽为 $1\,600\text{ mm}$ 。为了减小整机长度,最终设计的秸秆粉碎还田机与铧式犁的距离仅为 50 mm 。

2.2.2 整机纵垂面耕深稳定性

复式作业机中间连接装置及悬挂装置的设计关系到后置铧式犁能否入土,入土后耕深、耕宽是否稳定^[17-20]。为保证犁体能够正常入土,必须保证入土角为正且整机的运动瞬心在机具前方,必须保证机具在纵垂面的四连杆机构(拖拉机上悬挂点、下悬挂点,机具上悬挂点、下悬挂点在纵垂面组成的四连杆结构)和水平面的四连杆机构(拖拉机 2 个下悬挂点与机具 2 个下悬挂点在水平面内组成的四连杆机构)运动瞬心都在整机的前方^[21]。其中,纵垂面内悬挂参数能够决定铧式犁是否正常入土,也是影响耕深稳定性的关键因素。

2.2.2.1 机具纵垂面牵引角设计

复式作业机由秸秆粉碎还田机与铧式犁组成,秸秆粉碎还田机除了具有秸秆粉碎抛撒功能外,还具有平衡铧式犁的配重作用。研制的秸秆粉碎还田机质量 m_1 为 770 kg , 铧式犁质量 m_2 为 330 kg , 整机质量 m_3 为 $1\,100\text{ kg}$ 。图 5 为纵垂面受力分析示意图,其中秸秆粉碎还田机长度 L_1 为 $1\,460\text{ mm}$, 铧式犁长度 L_2 为 $2\,400\text{ mm}$, 秸秆粉碎还田机与铧式犁距离 L_4 为 50 mm , 机具总长度为 $3\,910\text{ mm}$ 。秸秆粉碎还田机与铧式犁质量均匀分布式为

$$L_3 = \frac{m_1 \frac{L_1}{2} + m_2 \left(L_1 + \frac{L_2}{2} + L_4 \right)}{m_3} \quad (4)$$

确定质心位置 O 与机架起始距离 L_3 为 $1\,324\text{ mm}$ 。

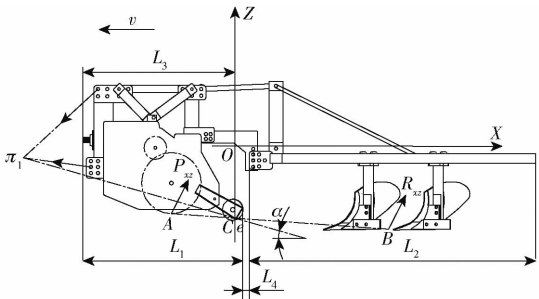


图 5 纵垂面受力分析示意图
Fig. 5 Schematic of longitudinal vertical surface stress analysis

由图 5 可知,秸秆粉碎还田机在作业时所受阻

力主要为粉碎刀粉碎秸秆时的阻力,此作用力在纵垂面内的分力为 P_{xz} ;为了方便分析,将 P_{xz} 对粉碎刀作用点简化至粉碎刀端点 A 。铧式犁在翻耕作业中所受阻

与沟壁摩擦力^[22-23]，土壤阻力与摩擦力在纵垂面内的分力之和为 R_{xz} ；由于铧式犁犁体在犁架上分布均匀，为了方便分析，将 R_{xz} 对犁体的作用点简化至 4 个犁体的长度几何中心点 B 。

过粉碎刀端点 A 与犁体长度几何中心点 B 的连线与过质心垂线相交于点 C 。整机的牵引线为 π_1e ，牵引线一端通过整机在纵垂面内的瞬心点 π_1 ，另一端点 e 为保证机具正常耕作需与点 C 相接近。若点 e 相对于点 C 向上偏移过大，则容易造成秸秆粉碎还田机离地距离过小，粉碎刀入土，铧式犁上翘，整机动力消耗增加^[24]；若点 e 相对于点 C 向下偏移过大，则容易造成秸秆粉碎还田机上翘，铧式犁入土过深^[25]。为了保证机器在纵垂面内的耕作稳定性，通过图解法^[26]确定牵引角 α 为 $15^\circ \sim 30^\circ$ 。

2.2.2.2 机具纵垂面悬挂参数设计

图 6 为复式作业机纵垂面悬挂示意图。图中 H_1 为拖拉机上悬挂点到其下悬挂点的高度； H_2 为秸秆粉碎还田机上悬挂点到其下悬挂点的高度； H_3 为铧式犁的上悬挂点到铧式犁机架的高度； L_5 为拖拉机下悬挂点到秸秆粉碎还田机下悬挂点的距离。由图 6 可知，为了使整机运动瞬心位于机器前方，必须满足 $H_3 > H_2$ 。由于整机质量比较大，需与 73.5 kW 以上的拖拉机相配套，根据 GB/T 1593—2015《农业轮式拖拉机 后置式三点悬挂装置 0、1 N、1.2 N、2、3 N、3.4 N 和 4 类》，73.5 kW 以上拖拉机的后置式三点悬挂装置属于 2N/2 这一类，则与拖拉机相挂接机具的上下悬挂点竖直距离为 610 mm，即： H_2 为 610 mm。1L-430 型铧式犁其上悬挂点与下悬挂点之间的距离 H_3 实际测量值为 720 mm，满足 $H_3 > H_2$ ，满足整机运动瞬心位于机器前方的要求。图中 L_6 为秸秆粉碎还田机下悬挂点到中间下悬挂点（图 1 复式作业机整机结构图中部件 5 为中间下悬挂点）的距离； L_7 为中间下悬挂点到铧式犁下悬挂点的距离，由中间下悬挂点到秸秆粉碎还田机末端的距离、秸秆粉碎还田机与铧式犁的距离、铧式犁首端到铧式犁下悬挂点的距离组成，设计的 L_7 为 700 mm。 L_8 为可调拉杆长度，计算式为

$$L_8 = \sqrt{(H_3 - H_2)^2 + L_7^2} \quad (5)$$

计算得 L_8 为 708 mm，选用的调节拉杆长度调节范围

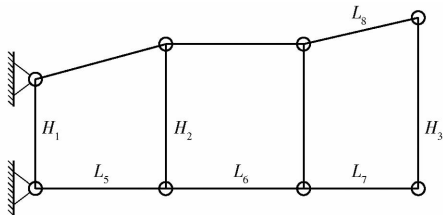


图 6 纵垂面的悬挂示意图

Fig. 6 Schematic of longitudinal vertical surface hanging

为 500 ~ 1 000 mm。

2.2.3 机具相对高度匹配性设计

为保持机具的正常作业，铧式犁与秸秆粉碎还田机的相对高度匹配也十分重要，相对高度过大或过小都无法保证正常作业。设计的秸秆粉碎还田机粉碎刀离地高度为 40 mm^[15]，而东北稻区要求铧式犁耕作深度一般为 150 ~ 200 mm，本文设计铧式犁耕作深度为 170 mm，则秸秆粉碎还田机粉碎刀与铧式犁犁尖的相对高度为 210 mm。通过连接架的连接孔来控制二者的相对高度。

2.3 水平面动力学匹配性

复式作业机在作业过程中，受到拖拉机牵引力、自身重力、土壤阻力及秸秆阻力等多个作用力。在拖拉机牵引力满足整机工作需要的前提下，整机在纵垂面内基本可以受力平衡，但是整机在水平面内无土壤约束，其在幅宽方向自由度较大，容易因受力不均而产生倾斜、旋转的现象，对耕作稳定性造成影响^[27]，因此进行机具结构设计时需要重点考虑机具在水平面内的受力平衡，需对机具进行动力学匹配性研究。

图 7 为机具在水平面的受力示意图，用 R_{xy} 表示 4 个犁体在水平面内所受土壤阻力分力，犁体所受的土壤阻力以力场的形式作用于犁体曲面^[28-29]，为方便分析，将犁体曲面所受的土壤阻力简化至犁体曲面中心。用 Q_{xy} 表示 4 个犁体的犁侧板与沟壁摩擦力在水平面内分力，该力作用在犁侧板中心点上。由于 4 个犁体分布均匀、受力情况一致，因此可将 R_{xy} 、 Q_{xy} 简化至犁体中心点连线的中点 F 上。机具所受牵引力在水平面内分力为 F_{xy} ，作用在秸秆粉碎还田机的前端中心点 D 处。秸秆粉碎还田机粉碎秸秆所受阻力在水平面内分力为 P_{xy} ，由于粉碎刀在粉碎刀辊上呈双螺旋线式排列，所以粉碎刀在 Y 轴方向上所受的阻力基本可以相互抵消，粉碎刀粉碎秸秆的阻力方向与 X 轴方向一致，作用在秸秆粉碎还田机中心位置的粉碎刀端点 E 处。根据平面力系平衡条件， Y 轴平衡方程为

$$\begin{cases} \sum F_y = 0 \\ F_{xy} = P_{xy} + Q_{xy} \sin\beta + R_{xy} \cos\beta \end{cases} \quad (6)$$

对质心位置取矩可得

$$\begin{cases} \sum M_o(F) = 0 \\ F_{xy} y_2 - P_{xy} y_2 - R_{xy} \cos\beta y_1 + R_{xy} \sin\beta x_1 - Q_{xy} \sin\beta y_1 - Q_{xy} \cos\beta x_1 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中 F_y ——机具水平面内 Y 轴方向受力，N

β ——犁体配置斜角，($^\circ$)

M_o ——水平面内质心位置力矩, $N \cdot m$
 x_1 ——点 F 至 Y 轴距离, mm
 y_1 ——点 F 至 X 轴距离, mm
 y_2 ——点 $D、E$ 至 X 轴距离, mm

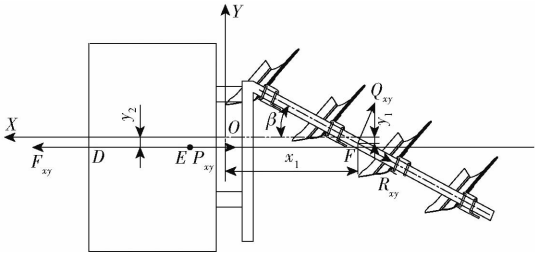


图 7 机具水平面受力示意图

Fig. 7 Schematic of level surface of machine tools

根据式(6)、(7)可知,机具的横向受力及力偶平衡均与犁体配置斜角 β 有关,为保证机具耕作稳定性, β 一般为 $23^\circ \sim 30^\circ$ 。选用 1L-430 型铧式犁,其配置斜角为 25° ,满足耕作稳定性参数要求。

2.4 连接装置结构设计

以秸秆粉碎还田机、铧式犁已有连接装置为基础,根据对横垂面、纵垂面、水平面分析得出的连接参数,进行连接装置结构设计,确定连接装置的结构如图 8 所示。图 8 中秸秆粉碎还田机悬挂装置、支撑架 I、支撑梁 I、支撑梁 II、支撑梁 III 为秸秆粉碎还田机已有连接部件,起到连接拖拉机及保证秸秆粉碎还田机强度的作用;铧式犁悬挂装置为铧式犁已有连接装置;其余零件(图 8 中深色零件)中间拉杆、支撑架 II、中间上悬挂点、可调拉杆、连接架、中间下悬挂点为设计的连接装置。

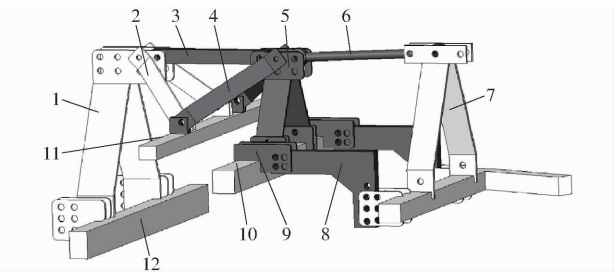


图 8 连接装置结构示意图

Fig. 8 Structure of connection device

- 1. 秸秆粉碎还田机悬挂装置 2. 支撑架 I 3. 中间拉杆 4. 支撑架 II 5. 中间上悬挂点 6. 可调拉杆 7. 铧式犁悬挂装置
- 8. 连接架 9. 中间下悬挂点 10. 支撑梁 III 11. 支撑梁 II 12. 支撑梁 I

根据横垂面幅宽匹配性研究,确定中间悬挂装置(中间上悬挂点、中间下悬挂点)的牵引中心与秸秆粉碎还田机中心线重合;同时根据支撑梁 III 与支撑梁 I 的相对高度、秸秆粉碎还田机悬挂装置高度,确定中间悬挂装置的高度为 420 mm。根据纵垂面作业位置匹配性研究,设计的秸秆粉碎还田机与铧

式犁的距离仅为 50 mm,结合支撑梁 III 与秸秆粉碎还田机末端的相对长度,最终确定二者连接架长度为 510 mm;同时,连接架的连接孔起到控制秸秆粉碎还田机与铧式犁相对高度的作用,根据上文分析的秸秆粉碎还田机粉碎刀与铧式犁犁尖的相对高度为 210 mm,结合中间下悬挂点与铧式犁下悬挂点相对高度,最终确定连接架高度为 330 mm,连接架上连接孔中心位置跟铧式犁销孔中心位置保持一致;根据机具纵垂面悬挂参数设计,确定可调拉杆长度为 708 mm,选用调节范围为 500 ~ 1 000 mm 的可调拉杆。

2.5 机具连接装置稳定性分析

在复式作业机作业过程中,由于受到外部载荷激励与自身系统内部激励作用,会使机具产生振动现象,从而影响机具的耕作稳定性。复式作业机粉碎与翻耕作业时都会产生振动现象,分析中间连接装置的稳定性对于保障整机的稳定性具有重要意义。粉碎作业时振动主要由粉碎刀、锯盘刀所受秸秆阻力及与万向轴、主加速器、副减速器等传动机构啮合高速旋转引起;翻耕时振动主要由犁体所受土壤阻力引起,此外复式作业机振动还受到拖拉机机体振动的影响^[30]。其中,犁翻时机具所受土壤阻力是引起整机振动的主要因素,拖拉机机体振动是影响整机操纵稳定的主要因素。

2.5.1 连接装置强度

为保证整机机具稳定性满足要求,采用 ANSYS Workbench 对关键连接装置进行静力学分析,分析连接装置是否满足强度要求。

在 ANSYS Workbench 中添加模型的材料属性,普通碳素结构钢(Q235)作为连接装置材料。根据实际情况,对秸秆粉碎还田机悬挂装置三点悬挂点施加固定端约束,由于秸秆粉碎还田机质量分布均匀,施加在秸秆粉碎还田机 3 根支撑梁上的力均为其重力的 1/3,即施加在 3 根支撑梁上的力均为 2 566.7 N。对于铧式犁而言,将施加在铧式犁重心位置的重力经过等力矩转换在铧式犁犁架前侧的力为 5 950 N。最后给整机施加重力加速度,来模拟连接装置的实际受力情况,连接装置的施加约束和载荷情况如图 9 所示。

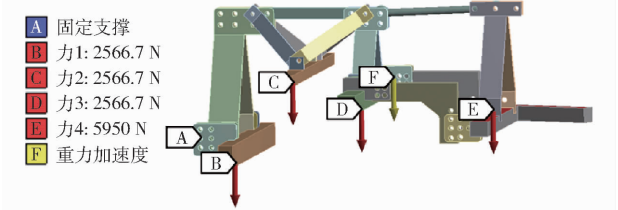


图 9 施加约束和载荷情况

Fig. 9 Apply constraints and load conditions

对连接装置进行网格划分^[31],共产生 23 912 个实体单元,涉及 53 167 个网格节点。对于连接装置进行模型求解及计算结果分析,得出连接装置的总变形量如图 10 所示。由图 10 可知,连接装置的最大总变形发生在铧式犁的犁架上,最大总变形量为 3.15 mm,能够满足连接装置强度要求。

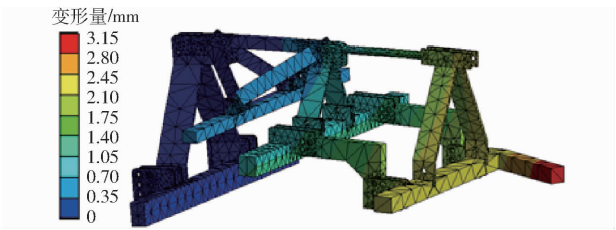


图 10 连接装置总变形量

Fig. 10 Total deformation of connection device

2.5.2 连接装置操纵稳定性

复式作业机操纵稳定性可以分为工作状态和运输状态 2 种情况。整机工作状态稳定性通过田间试验的耕深及耕宽稳定性进行评价,整机运输状态的稳定性通过 ANSYS Workbench 进行分析,通过对关键连接装置添加动态载荷,分析运输中拖拉机振动对关键连接装置的影响规律。

由于该复式作业机机具较长,在拖拉机运输机具过程中,拖拉机振动对连接装置的影响较大^[32]。根据徐刚等^[33]研究的国内 100 种不同型号、不同功率、不同质量拖拉机的固有频率,当这些拖拉机在路

面行走时,其振动系统的垂向、俯仰和侧倾振动固有频率分别集中在 3 ~ 4 Hz、2.8 ~ 3.8 Hz 和 2.9 ~ 3.9 Hz;设计的复式作业机其配套的拖拉机动力为 75 ~ 95 kW,相应的拖拉机振动频率为 3 ~ 3.25 Hz。为了研究该复式作业机在运输过程中,拖拉机振动对机具可靠性的影响,在 ANSYS Workbench 有限元分析中给机具添加 3 ~ 10 Hz 的振动载荷(添加的振动载荷大于实际拖拉机的振动载荷),以研究拖拉机振动对连接装置变形的影响规律。在连接装置静力学分析的基础上进行连接装置的动态分析,在添加已有载荷的基础上,再额外添加振动载荷。连接装置的 6 阶模态固有频率如表 2 所示。

表 2 连接装置 6 阶模态固有频率

Tab. 2 Six modes natural frequencies of connection device

模态阶数	1	2	3	4	5	6
固有频率/Hz	5.280 6	7.063	10.702	19.368	27.234	32.621

振动载荷作用下连接装置 6 阶模态振型如图 11 所示。为避免共振,激振频率 ω 和固有频率 ω_0 通常要求: $\omega < 0.7\omega_0$ 或 $\omega > 1.4\omega_0$ 。连接装置最低固有频率 ω_0 为 5.280 6 Hz, $0.7\omega_0$ 约为 3.70 Hz,拖拉机振动频率(3 ~ 3.25 Hz)不在此范围内,因而连接装置不会随着拖拉机振动产生共振现象。由图 11 可知,在第 1 阶模态时(固有频率为 5.280 6 Hz),连接装置最大变形量为 2.553 5 mm,表明设计的连接装置满

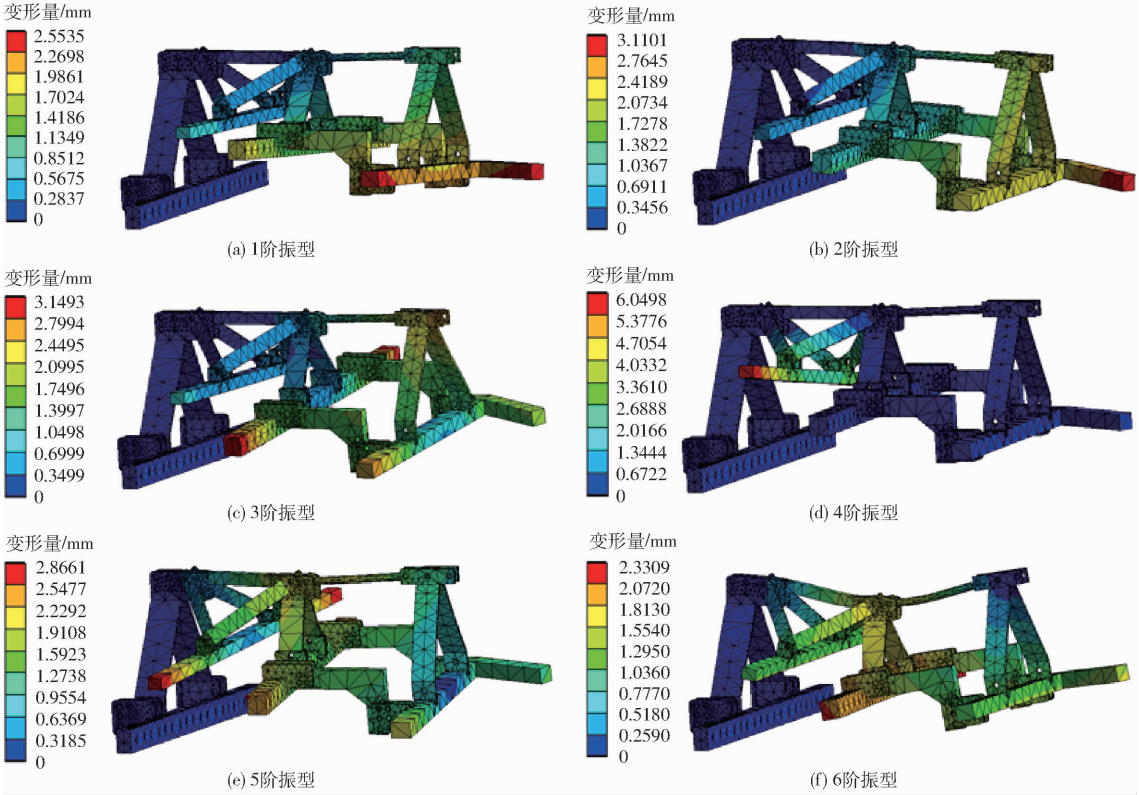


图 11 连接装置 6 阶模态振型

Fig. 11 Six order mode shape diagrams of connection device

足拖拉机运输机具过程中的强度要求。

3 复式作业与分段作业田间对比试验

3.1 试验条件

试验于 2019 年 10 月在黑龙江省哈尔滨市民主试验田进行,作业前地表情况如图 12 所示。该地块 15 ~ 20 cm 的土壤紧实度为 420 ~ 635 kPa,土壤含水率为 25% ~ 30%;秸秆平均长度为 45.8 cm,秸秆留茬高度为 19.7 cm,秸秆含水率为 18.4%,秸秆量为 8.6 t/hm²,秸秆抛撒不均匀度为 76.2%。



图 12 作业前地表情况
Fig. 12 Operation condition

复式作业与分段作业作业前的地表情况相同,采用的秸秆粉碎还田机和铧式犁均为同一机具。秸秆粉碎还田机前进速度一般为 3.0 ~ 5.0 km/h,铧式犁前进速度一般为 3.5 ~ 5.5 km/h,复式作业机进行作业时,其前进平均速度为 3.6 km/h。田间试验时首先进行复式作业试验,试验同时进行油耗测试。由于复式作业需要的拖拉机功率大,一般需要 75 kW 以上,而单独的秸秆粉碎抛撒或者犁翻不需要采用大功率的拖拉机,所以为了尽可能地与实际作业相符合,分段作业采用的拖拉机功率比复式作业时采用的拖拉机功率小。分段作业的拖拉机根据东北稻区常见的秸秆粉碎或犁翻时的拖拉机功率进行配套,本研究选取分段作业的拖拉机功率为 51 kW。

3.2 复式作业与分段作业耕作稳定对比

机具耕深、耕宽稳定性系数是评价复式作业机作业性能的重要指标。耕深、耕宽稳定性系数的试验方法参照 GB/T 14225—2008《铧式犁》进行测试、计算。

(1) 耕深和耕深稳定性测试指标及方法

取样时,每种工况前进和返回方向各不少于 2 个行程。沿机组前进方向每隔 2 m 左、右两侧各取一点,每个行程测量 20 个点,用卷尺测量每个测量点耕深,共测 3 个行程。计算时,一个行程中左、右两测量点各算一个单独行程。

用卷尺测量最后犁体耕深。分别计算出每一工况的平均耕深、变异系数和耕深稳定性系数。

(2) 耕宽和耕宽稳定性测试指标及方法

沿垂直机组运动方向测定两个相邻行程犁沟沟

墙之间的水平距离即为耕宽,在测定耕深的相应处进行测量耕宽,分别计算每行程和每种工况的平均耕宽变异系数和耕宽稳定性系数。

表 3 为测量的复式作业与分段作业的铧式犁耕深、耕宽稳定性参数对比。经分析,分段作业机具稳定性与复式作业机具稳定性无显著性差异。图 13 为复式作业机作业过程,连接装置保证整机能够稳定作业。

表 3 耕深和耕宽稳定性参数

Tab. 3 Stability parameters of tillage depth and width

检测指标	复式作业	分段作业
耕深/cm	17.3	17.1
工况耕深稳定性系数/%	91.2	94.3
耕宽/cm	119.2	119.8
工况耕宽稳定性系数/%	93.6	96.2



图 13 复式作业机作业过程
Fig. 13 Operation process diagram of duplex operation machine

3.3 复式作业与分段作业秸秆掩埋效果及油耗对比

3.3.1 秸秆掩埋效果对比

复式作业与分段作业均采用翻耕的方式掩埋秸秆,测试指标以植被覆盖率为主要指标,测试及计算方法根据 GB/T 14225—2008《铧式犁》进行。

试验测定 2 个行程,每个行程测 3 个测点,在已耕地上取宽度为 2b、长度为 30 cm 的面积,分别测定地表以上的植被和残茬质量,地表以下 8 cm 深度内的植被和残茬质量以及 8 cm 以下耕层内的植被和残茬质量。植被覆盖率计算公式为

$$F_b = \frac{Z_2 + Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \times 100\% \quad (8)$$

式中 F_b ——地表以下植被和残茬覆盖率,%

Z_1 ——露在地表以上的植被和残茬质量,g

Z_2 ——地表以下 8 cm 深度内的植被和残茬质量,g

Z_3 ——8 cm 深度以下植被和残茬质量,g

图 14 为复式作业机与秸秆粉碎还田机、铧式犁分段作业的效果对比。通过测量,复式作业的植被覆盖率为 95.7%,分段作业的植被覆盖率为 98.3%,二者无显著性差异。



图 14 复式作业与分段作业作业效果对比

Fig. 14 Comparison of duplex operation and section operation

3.3.2 油耗对比

在机具进地后,先将拖拉机油箱加满油,然后拖拉机带动机具作业 666.67 m²后,再将拖拉机油箱加满,通过电子秤记录中间差的油质量并计数。重复 3 次,平均值作为机具作业的油耗,得出复式作业与分段作业的油耗如表 4 所示。由表 4 可知,虽采用复式作业需要的拖拉机动力比分段作业大,但一次下地总的油耗比分段作业的油耗低,可节省油耗 3.15 kg/hm²,且复式作业减少了机具下地作业次数、减少土壤压实。

通过田间对比试验可知,复式作业与分段作业相比其优势明显。主要表现在,从经济层面看,其属于综合作业,油耗低,工作效率高;从作业质量层面看,其作业效果与分段作业无显著性差异。因此,从整体分析该复式作业机属于高效节能型农机具。同

表 4 复式作业与分段作业油耗

Tab.4 Fuel consumption cost of duplex operation and section operation

			kg/hm ²
作业	粉碎抛撒	犁翻	合计
分段	13.35	22.95	36.30
复式			33.15

时,连接装置采用可拆卸式设计,也可根据作业前地表秸秆的粉碎抛撒质量来具体决定是否复式作业。

4 结论

(1)设计的连接装置可连接秸秆粉碎还田机与整地机,一次下地可实现秸秆粉碎、抛撒、翻埋多项作业,减少机具下地作业次数;同时,设计的连接装置采用可拆卸式设计,也可根据作业前地表情况来具体决定是否复式作业。

(2)通过理论分析对连接装置进行横垂面、纵垂面、水平面 3 个运动平面的匹配性研究,设计的连接装置能够实现秸秆粉碎还田与犁耕的匹配。通过 ANSYS Workbench 对关键连接装置进行静力学分析及动态分析,设计的装置满足强度要求及运输状态的稳定性要求。

(3)通过复式作业与分段作业的田间试验表明,该复式作业机能够达到正常铧式犁的工作稳定性,耕深、耕宽稳定性系数分别为 91.2%、93.6%;复式作业植被覆盖率达 95.7%,与分段作业相比无显著性差异,且复式作业油耗降低 3.15 kg/hm²。

参 考 文 献

[1] 王金武,唐汉,王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J]. 农业机械学报,2017,48(5):1-21.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1-21. (in Chinese)

[2] 王秋菊,焦峰,刘峰,等. 秸秆粉碎集条深埋机械还田模式对玉米生长及产量的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(9):153-159.
WANG Qiuju, JIAO Feng, LIU Feng, et al. Effect of straw pulverization and concentrated deep-buried into field on growth and yield of maize[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 153-159. (in Chinese)

[3] 孙妮娜,王晓燕,李洪文,等. 东北稻区不同秸秆还田模式机具作业效果研究[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):68-74,154.
SUN Ni'na, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Performance of straw returning equipment under different mechanized straw returning pattern in Northeast rice area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 68-74, 154. (in Chinese)

[4] 王金峰,陈博闻,姜岩,等. 水稻秸秆全量深埋还田机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(1):84-93.
WANG Jinfeng, CHEN Bowen, JIANG Yan, et al. Design and experiment on machine for rice straw full quantity deep buried into field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 84-93. (in Chinese)

[5] 郑侃. 深松旋耕作业次序可调式联合作业机研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
ZHENG Kan. Study on subsoiling and rotary tillage operation adjustable combine machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[6] 赵大勇,李连豪,许春林,等. 1ZQHF-350/5 型前后分置悬挂式联合整地机[J]. 农业机械学报,2014,45(10):91-96.
ZHAO Dayong, LI Lianhao, XU Chunlin, et al. 1ZQHF-350/5 hang combined cultivating machine with front-stubble-breaking, post-subsoil and rotary-tilling equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):91-96. (in Chinese)

[7] HBNGLEI J, CHENGLIN M, JIN T. Study on universal blade rotor for rototilling and stubble-breaking machine[J]. Soil and

- Tillage Research, 2007, 94(1): 201–208.
- [8] RAHEMAN H, ROUL A K. Combination tillage implement for high horse power 2WD tractors[J]. AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America, 2013, 44(3): 75–79.
- [9] UPADHYAY G, RAHEMAN H. Performance of combined offset disc harrow (front active and rear passive set configuration) in soil bin[J]. Journal of Terramechanics, 2018, 78: 27–37.
- [10] 李永磊, 宋建农, 王继承, 等. SGTN-180 型旋耕埋草施肥联合作业机的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(2): 143–147.
- LI Yonglei, SONG Jiannong, WANG Jicheng, et al. Design and experiment of a SGTN-180 type rotary tillage-straw returning-fertilization combined machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(2): 143–147. (in Chinese)
- [11] 朱继平, 彭卓敏, 袁栋, 等. 秸秆粉碎旋耕联合作业技术及机具的研究[J]. 中国农机化, 2006, 27(6): 89–91.
- [12] 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)
- [13] USABORISUT P, PRASERTKAN K. Performance of combined tillage tool operating under four different linkage configurations[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 183: 109–114.
- [14] 秦宽, 丁为民, 方志超, 等. 犁翻旋耕复式作业耕整机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 7–16.
- QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 7–16. (in Chinese)
- [15] 孙妮娜, 王晓燕, 李洪文, 等. 差速锯切式水稻秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 267–276.
- SUN Nina, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Design and experiment of differential sawing rice straw chopper for turning to field[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 267–276. (in Chinese)
- [16] 章志强. 玉米秸秆粉碎抛撒还田机的设计与秸秆运动特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- ZHANG Zhiqiang. Research on corn straw chopping and spreading machine design and dynamic characteristic of straw[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [17] 张欣悦, 赵大勇, 许春林, 等. 1GMMZ-280/4 型垄作组合式灭茬旋耕整地机[J]. 农机化研究, 2012, 34(6): 104–107.
- ZHANG Xinyue, ZHAO Dayong, XU Chunlin, et al. The development of 1GMMZ-280/4 type ridge culture combined-type stubble ploughing, spin tillage soil preparation machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(6): 104–107. (in Chinese)
- [18] 张居敏, 周勇, 夏俊芳, 等. 旋耕埋草机螺旋横刀的数学建模与参数分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 18–25.
- ZHANG Jumin, ZHOU Yong, XIA Junfang, et al. Mathematical modeling and analysis of helical blade for stubble burying rotary tiller[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 18–25. (in Chinese)
- [19] HIGGINBOTHAM R W, JONES S S, CARTER A H. Wheat cultivar performance and stability between no-till and conventional tillage systems in the Pacific Northwest of the United States[J]. Sustainability, 2013, 5(3): 882–895.
- [20] ONWUALU A P, WATTS K C. Draught and vertical forces obtained from dynamic soil cutting by plane tillage tools[J]. Soil & Tillage Research, 1998, 48(4): 239–253.
- [21] 李宝堃. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [22] 车刚, 张伟, 梁远, 等. 3ZFC-7 型全方位复式中耕机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 130–135.
- CHE Gang, WANG Wei, LIANG Yuan, et al. Design and experiment of the 3ZFC-7 omni-bearing duplex type cultivator[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 130–135. (in Chinese)
- [23] 吕金庆, 刘齐卉, 李紫辉, 等. 犁铧式马铃薯中耕机培土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 71–82.
- LÜ Jinqing, LIU Qihui, LI Zihui, et al. Design and experiment of soil cultivating device of plowshare potato field cultivator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 71–82. (in Chinese)
- [24] 蒋金琳, 龚丽农, 王东伟, 等. 免耕播种机双刀盘有支撑切茬破茬装置的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 17–22.
- JIANG Jinlin, GONG Linong, WANG Dongwei, et al. Development and experiment for driving double coulters anti-blockage device of no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 17–22. (in Chinese)
- [25] 谢斌, 李皓, 朱忠祥, 等. 基于倾角传感器的拖拉机悬挂机组耕深自动测量方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 15–21.
- XIE Bin, LI Hao, ZHU Zhongxiang, et al. Measuring tillage depth for tractor implement automatic using inclinometer[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4): 15–21. (in Chinese)
- [26] 王河曾. 用图解法和计算法确定铧式犁的斜支杆[J]. 东北农学院学报, 1983(4): 66–71.
- WANG Hezeng. Determine a oblique rod of bottom plow with graphic and calculating methods[J]. Journal of Northeast Agricultural College, 1983(4): 66–71. (in Chinese)
- [27] 秦宽, 丁为民, 方志超, 等. 复式耕整机耕深与耕宽稳定性分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 1–8.
- QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Analysis and experiment of tillage depth and width stability for plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 1–8. (in Chinese)
- [28] RADITE P A S, HERMAWAN W, CROSBY H B, et al. Experimental investigation on the application of vibration to reduce draft requirement of subsoiler[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2010, 19(1): 31–38.