

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.10.001

葛宜元, 孙修涵, 刘恒佳, 等. 寒地黑土区水稻秸秆还田机设计及最优耕作参数试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(10): 01-08

Ge Yiyuan, Sun Xiuhuan, Liu Hengjia, et al. Design of rice straw returning machine and test of optimal tillage parameters in cold black soil area [J].

Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(10): 01-08

寒地黑土区水稻秸秆还田机设计及最优耕作 参数试验*

葛宜元^{1, 2}, 孙修涵¹, 刘恒佳¹, 马浏轩^{1, 2}, 梁秋艳^{1, 2}, 杨传华^{1, 2}

- 佳木斯大学机械工程学院, 黑龙江佳木斯, 154007;
- 黑龙江省田间农业工程技术装备重点实验室, 黑龙江佳木斯, 154007)

摘要:针对寒地黑土区水稻秸秆还田机消耗功率大、秸秆腐解速度慢的问题,设计具有腐解剂精量喷施功能的秸秆还田机,并探究刀轴扭矩最小时的耕作参数组合。对还田机的自动升降平地装置、菌剂喷洒装置、秸秆量识别系统和还田弯刀进行设计;菌剂喷洒装置采用由PLC驱动的电磁阀控制喷施量;秸秆量识别系统可分别对粉碎堆积秸秆和留茬秸秆进行数量评估并将数据信息传递至菌剂喷洒装置;还田弯刀设计采用Workbench 2022 R1软件进行仿真分析,得到弯刀最佳参数结果:弯刀刃长240 mm、刃宽80 mm、弯折角115°;采用三因素三水平旋转正交试验,建立刀轴扭矩与试验因素的关系。采用Design-Expert软件进行方差分析处理,结果表明,因素对指标影响的顺序关系为:耕深>旋转速度>单位面积秸秆量>耕深的二次项>耕深与旋转速度的交互作用>旋转速度与单位面积秸秆量的交互作用,并得到交互作用的响应曲面图以及最优参数组合为耕深20 cm、旋转速度为240 r/min、单位面积秸秆量为3.5 kg/m²。进行验证性试验,得到扭矩平均值为24.32 N·m,与模型预测值的相对误差为0.7%,预测模型可靠,且秸秆翻埋率达96.8%。

关键词:寒地黑土区;秸秆还田机;静力学仿真;精量喷药;最优设计

中图分类号:S232.3 文献标识码:A 文章编号:2095-5553(2024)10-0001-08

Design of rice straw returning machine and test of optimal tillage parameters in cold black soil area

Ge Yiyuan^{1, 2}, Sun Xiuhuan¹, Liu Hengjia¹, Ma Liuxuan^{1, 2}, Liang Qiuyan^{1, 2}, Yang Chuanhua^{1, 2}

- School of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi, 154007, China;
- Heilongjiang Key Laboratory of Field Agricultural Equipment Engineering Technology, Jiamusi, 154007, China)

Abstract: Aiming at the problems of high-power consumption and slow straw decomposition speed of rice straw returner in the cold black soil area, a straw returner with the function of fine spraying of decomposers was designed, and the combination of ploughing parameters with the minimum torque of the knife shaft was explored. The automatic lifting-and-levelling device, the fungicide spraying device, the straw quantity identification system and the curved cutter of the field returning machine were designed. The fungicide spraying device adopted the PLC-driven solenoid valve to control the spraying quantity. The straw quantity identification system could evaluate the quantities of crushed-and-piled-up straw and stubble straw respectively and transfer the data information to the fungicide spraying device. Workbench 2022 R1 software was used to simulate and analyze the design of field return cutter, and the optimum parameters of the cutter were 240 mm blade length, 80 mm blade width and 115° bending angle. A three-factor-three-level rotary orthogonal test was used to establish the relationship between the cutter torque and the test factors. Design-Expert software was used for ANOVA processing, and the results showed that the relationships of the factors on the indexes were as follows: A >

收稿日期:2024年3月29日 修回日期:2024年4月26日

*基金项目:国家自然科学基金项目(51875252);黑龙江省科学基金项目(LH2020E026);中央引导地方科技发展专项项目(ZYYD2022JMS005);黑龙江省教育厅科技创新团队建设计划项目(2021-KYYWF-0639);黑龙江省“双一流”新一轮建设学科协同创新成果建设项目(LJGXCG2022-128)

第一作者:葛宜元,女,1982年生,黑龙江七台河人,博士,教授;研究方向为农业机械化工程、农业机械设计及试验。E-mail:geyiyuan@qq.com

$B > C > A^2 > AB > BC$ (A is the ploughing depth, B is the rotational speed, C is the amount of straw per unit area). The response surface plot of the interaction was obtained and the optimal parameter combinations was the ploughing depth of 20 cm, the rotational speed of 240 r/min, and the amount of straw per unit area of 3.5 kg/m². A validation test was carried out, and the test results showed that the average torque was 24.32 N·m, the relative error with the predicted value of the model was 0.7%, the prediction model was reliable and the straw burying rate reached 96.8%.

Keywords: cold black soil area; straw returning machine; hydrostatic simulation; precision spraying; optimal design

0 引言

三江平原地处东北平原黑土区,是我国核心商品粮基地,粮食产量和质量均居全国前列,压舱石地位不可动摇。与此同时,秸秆处理问题一直是国家机关各级政府关注的重大问题之一,出台了相关政策指导和促进秸秆综合化利用。秸秆还田不仅能增加土壤有机质,还可以改善土壤的原有容重、容热量、保湿能力、孔隙度等物理性状;改善土壤中微生物的丰度等参数,成为秸秆处理的重要方法之一^[1]。

近年来,国内外都加大了还田设备的研发。国外广泛使用美国研制的 John Deere-HX 型秸秆粉碎还田机、John Deere C440 型稻麦联合收获机配套粉碎还田装置、John Deere-Y215 型自走式玉米联合收获机、意大利研制的 DRACULA 联合整地机、TORNADO 秸秆粉碎还田机、VELOCE 灭茬缺口圆盘耙等,日本学者对欧美秸秆还田装置进行了改进,研制出符合自己国情的还田装置,可实现联合作业^[2,3]。

为了降低功耗、提高作业质量,国内学者还针对不同地域,研究弯刀结构参数、机具作业参数对旋耕刀三向工作阻力、深旋节能和作业性能的影响。王后升^[4]设计了一种旋耕刀一埋指组合式秸秆还田机,建立土壤—秸秆—根茬—机具离散元仿真模型并进行单因素试验,确定了机具最佳结构与工作参数;刘熙明等^[5]采用尼龙网袋法探究覆盖和翻压两种还田方式对秸秆腐解率的影响,得出翻压处理可大幅促进秸秆腐解的结论;但针对秋收后气温较低的黑龙江省等寒区,翻埋后秸秆不易腐解的问题并未得到解决。

本文设计具有腐解剂精量喷施功能的新型秸秆还田机,通过机器视觉采集秸秆量数据信息,并利用 PLC 与上位机器视觉系统构建通信,调节菌剂喷量,解决秸秆腐解慢的问题。针对寒地黑土水稻秸秆还田区域,进行耕作参数优化试验,选取最优弯刀作业参数和最优秸秆还田量,达到降低还田机功率消耗的效果,为寒地黑土区秸秆还田技术模式的建立提供参考。

1 还田机结构及工作原理

秸秆还田机由三点悬挂装置、变速箱、机架、中心

犁、菌剂喷洒装置、还田刀辊、平地装置、传动装置等组成,其结构如图 1 所示。

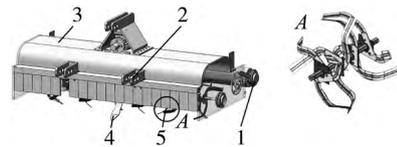


图 1 整机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of machine

1.平地装置 2.三点悬挂装置 3.机架 4.中心犁 5.还田刀辊

秸秆还田机通过三点悬挂装置与拖拉机相连,传动系统由拖拉机动力输出轴经由变速箱及侧边传动机构传递到刀辊。刀辊前方置有生物菌剂喷洒装置,喷洒装置一端与药箱相连,另一端采用电磁阀控制喷嘴开闭,可将耕作前的土壤与秸秆混合一定量的秸秆腐熟剂,以达到秸秆快速腐熟的目的。机具采用正转作业的方式,一部分秸秆随着弯刀埋入土中,另一部分秸秆与土壤随着弯刀向后上方抛出。由于秸秆质量小,被抛起高度低,在空中运动时间短,土壤被弯刀抛起的高度相对较高,受空气阻力等因素影响,在空中运动时间长。因此,秸秆与土壤落入被切出的沟底存在时间差,秸秆先于土壤落入沟底,被随后落下的土壤覆盖,从而完成秸秆还田作业。

2 关键部件设计分析

2.1 自动升降平地装置设计

自动升降平地装置位于整机行走方向后部下方,由压辊、推杆、拨轮等组成,结构如图 2 所示。位于整机作业方向后侧,其中杆 1 固定在机架两侧,升降装置位于机架内,杆 2 与拨轮的一个齿固定,卡块通过卡住不同位置的齿来调节压辊高度。压辊起到减少土壤孔隙作用,减少水分蒸发,适当提高地温,促进秸秆腐解^[6]。

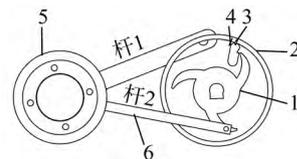


图 2 平地装置结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the grader's structure

1.拨轮 2.外轮毂 3.卡块 4.挡板 5.压辊 6.推杆

自动升降平地装置分为镇压机构和旋转机构^[7],二者通过连杆相连。考虑到连杆只在压辊重力 G 、拉力 N 、压力 F 作用下平衡^[8],受力分析图简化如图 3 所示。

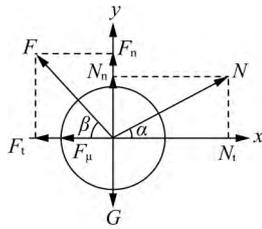


图 3 受力分析简图

Fig. 3 Schematic diagram of force analysis

由图3可知, $F_t = F \cos \beta$; $F_n = F \sin \beta$; $N_n = N \sin \alpha$; $N_t = N \cos \alpha$, 得出升降装置受力分析如式(1)所示。

$$\begin{cases} N \cos \alpha - F \cos \beta - F_t = 0 \\ G - N \sin \alpha - F \sin \beta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

- 式中: F ——压辊所受杆 2 压力, N;
 N ——压辊所受杆 1 的拉力, N;
 F_t ——压辊所受杆 2 切向压力, N;
 F_n ——压辊所受杆 2 法向压力, N;
 N_n ——压辊所受杆 1 法向拉力, N;
 N_t ——压辊所受杆 1 切向拉力, N;
 F_μ ——工作时压辊所受的土壤阻力, N;
 α ——拉力 N 与 x 轴夹角, ($^\circ$);
 β ——压力 F 与 x 轴夹角, ($^\circ$)。

秸秆还田机耕作时, 自动升降平地装置受力主要集中在拉杆上, 通过校核得出, 杆 1 的横截面积最小为 14.4 cm^2 , 杆 2 的横截面积最小为 8.3 cm^2 。

2.2 菌剂喷洒装置设计

菌剂喷洒装置由进出油口、药箱、电磁阀、喷药嘴组成^[9], 如图 4 所示; 菌剂喷洒原理如图 5 所示, 由电气控制, 通过一个直流电压源串接保护电阻、SPST 开关和电磁阀构成, SPST 开关的通断由上位的视觉识别系统控制。

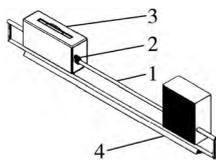


图 4 菌剂喷洒装置

Fig. 4 Device of fungicide spraying
1. 药管 2. 电磁阀 3. 药箱 4. 喷药嘴

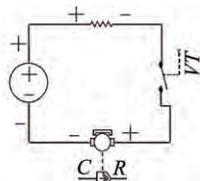


图 5 菌剂喷洒电气原理图

Fig. 5 Electrical schematic diagram for fungicide spraying

通过控制电磁阀的通断来改变腐解剂喷量, 机具行驶到秸秆上方时打开电磁阀, 进行喷药; 驶离秸秆时

则关闭电磁阀^[10]。控制系统可根据秸秆还田机的行驶速度对腐解剂喷量做出调整, 保证单位面积喷药量相对稳定, 喷量与机具作业速度的关系如式(2)所示。

$$Q = \frac{600q_s n}{Bv_m} \quad (2)$$

- 式中: Q ——喷量, L/hm^2 ;
 q_s ——单个喷头喷量, L/min ;
 n ——喷药嘴个数, 个;
 B ——喷幅, m ;
 v_m ——机具作业速度, km/h 。

菌剂喷洒装置由前方拖拉机液压系统提供动力, 每公顷使用秸秆腐解剂 $15 \sim 30 \text{ kg}$ 并稀释 $10 \sim 100$ 倍放入药箱中, 采用 PLC 调控电磁阀通断时间, 进而控制腐解剂喷量; 为确保菌剂施放均匀, 还可在喷药嘴加装超声波打散器对菌剂做雾化处理。

2.3 基于机器视觉的秸秆量识别系统设计

为更合理地进行菌剂释放, 确保在秸秆量较少处减少菌剂喷量, 在秸秆量较多处保证足够的菌剂释放量, 在菌剂喷洒装置前级增设基于机器视觉的秸秆量识别系统^[11, 12]。在对秸秆量的识别中, 针对检测目标的不同可分别采用基于 OpenMV 的色域识别和基于搭载 YOLOv5 的树莓派深度学习识别, 秸秆根据形态及铺放方式特征分类如图 6 所示^[13, 14], 秸秆根据种类进行识别的原理如图 7 所示。



图 6 秸秆分类示意图

Fig. 6 Schematic diagram of straw classification

1. 留茬秸秆 2. 粉碎堆积秸秆

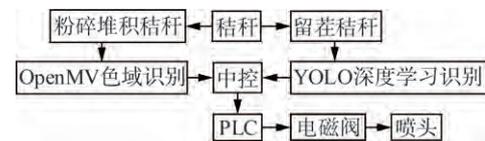


图 7 秸秆识别原理图

Fig. 7 Schematic diagram of straw identification

在对粉碎堆积秸秆量进行识别时, 采用基于 OpenMV 的色域识别^[15]。首先将 QVGA 摄像头安装于机体前部或刀辊前部, 该摄像头分辨率 $320 \text{ 像素} \times 240 \text{ 像素}$, 即每帧图像为 $204 \ 800$ 个像素点, 易知摄像头拍摄画面实际为摄像头前方梯形画面, 计算摄像头画面内图像在实际土地上的占地面积 S ; 因为还田机行驶较慢, 通常速度为 $4 \sim 6 \text{ km}/\text{h}$, 设定摄像头延迟时间 1 s , 即每秒记录一帧画面并作图像处理; 而后测定

土壤的RGB值域(因秸秆颜色相较土壤更不统一),在还田机运行时,摄像头即时拍摄机体前部或刀辊前部视频画面,对画面进行颜色识别并作图像二值化处理:将落入RGB值域的颜色转化为白色(即土壤),不落入RGB值域的颜色转化为黑色(即秸秆),对二值化颜色反转,使白色区域为秸秆,黑色区域为土壤,由串口输出白色像素点个数 a ,设定单位面积内对秸秆需释放的菌剂量为 c ,即

$$V = \frac{a}{204\ 800} \times Shc \quad (3)$$

式中: V ——单位时间内对堆积秸秆的菌剂总喷量(检测周期为1 s,即1 s内的喷量),mL;

h ——平均堆积高度,m。

在对留茬秸秆进行识别时,首先通过YOLOv5对留茬秸秆图像进行深度学习^[16],将至少160张含留茬秸秆的照片录入YOLOv5并标注留茬秸秆,存储为训练集;将至少40张不含留茬秸秆但含石头、树、水渠的图片录入YOLOv5,存储为测试集(YOLOv5要求训练集不低于100份样本且训练集与测试集之比为4:1)并进行学习;将系统脱机运行于还田机上,选用与OpenMV相同的QVGA摄像头并安装于机体前部或刀辊前部,同理设定延迟时间为1 s;视觉识别系统对每帧画面内的留茬秸秆进行锚定和框选,并每秒由串口输出锚定框数量 b ,设定每株留茬秸秆需释放的菌剂量为 v_1 ,即

$$V' = v_1 \times b \quad (4)$$

式中: V' ——单位时间内对留茬秸秆的菌剂总喷量,mL。

对粉碎堆积秸秆和留茬秸秆进行识别的两种视觉识别系统分别连接一套菌剂喷洒装置,均独立工作。

2.4 还田弯刀仿真优化

采用Workbench 2022 R1对现有的弯刀进行优化,弯刀因素水平表如表1所示,其中,刃长指刀刃侧两端点间的直线距离。

表1 因素水平表
Tab. 1 Table of factors and levels

水平	因素		
	刃长/mm	刃宽/mm	折弯角度/(°)
1	240	70	115
0	270	75	120
-1	300	80	125

首先采用三维制图软件SolidWorks2020进行弯刀建模^[17],保存为x_t格式文件,将其导入Workbench 2022 R1中对还田弯刀进行材料定义,如表2所示。最后进行网格划分、施加边界条件和作用力。

表2 材料参数

Tab. 2 Material parameters

参数	材料	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切模量 G /MPa	泊松比
数值	65Mn	7 861	79 000	0.29

在Workbench 2022 R1前处理中分别对还田弯刀不同因素水平进行高质量三角形自主网格划分,并进行人为修正。划分网格后的还田弯刀如图8所示,边界条件如图9所示。

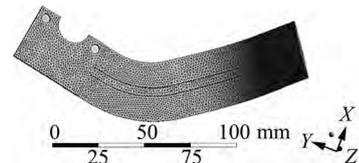


图8 弯刀网格划分(单元尺寸3.0 mm)

Fig. 8 Meshing of machete (unit size 3.0 mm)

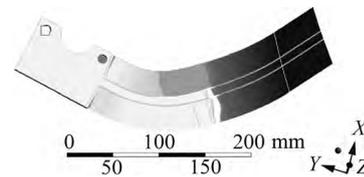


图9 弯刀边界条件(固定支撑为两个螺孔)

Fig. 9 Scimitar boundary condition (the fixed supports are two screw holes)

对不同还田弯刀进行静力学分析时,将刀柄中的螺孔设定为边界约束条件。由实际耕作情况可知,弯刀正切刃和侧切刃处先接触土壤,随后对土壤进行切削,在切削过程中其与碎茬、碎石、土壤相互接触,受力大小方向随弯刀位置而变化,为便于静力学仿真,将弯刀所受的力进行简化。查询资料可知,刀刃切入土壤时所受压强主要受土壤类型及密实程度有关,通常来说切削软土压强较低,约为0.1~1 MPa,中等硬度的土壤压强约为1~5 MPa,而对于坚硬的土壤,在切削时的压强可达10 MPa以上;经试验在黑龙江省佳木斯市桦南县曙光农场水稻田地的土壤切削压强约为5 MPa,故在刀刃表面施加5 MPa的均布载荷,压强施加方案如图10所示。

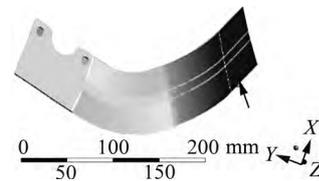


图10 刀片受压强示意图

Fig. 10 Schematic of the direction of pressure applied to the blade

2.5 仿真试验结果与分析

仿真试验结果表明,与刀身较近的刀柄安装孔处应力较大,同时在侧切面弯曲中心线附近,会产生应力集中。对不同刃长还田弯刀进行静力学分析,计算结果如图11所示,固定刃宽为70 mm,弯折角度为115°,

选择刃长为 240 mm、270 mm、300 mm，应力集中处均为侧切面中心线中部及下位螺孔处，应力随着刃长增长而变大，当刃长为 240 mm 时，弯刀所受应力相对均匀，且最大应力最小，为 399.79 MPa。

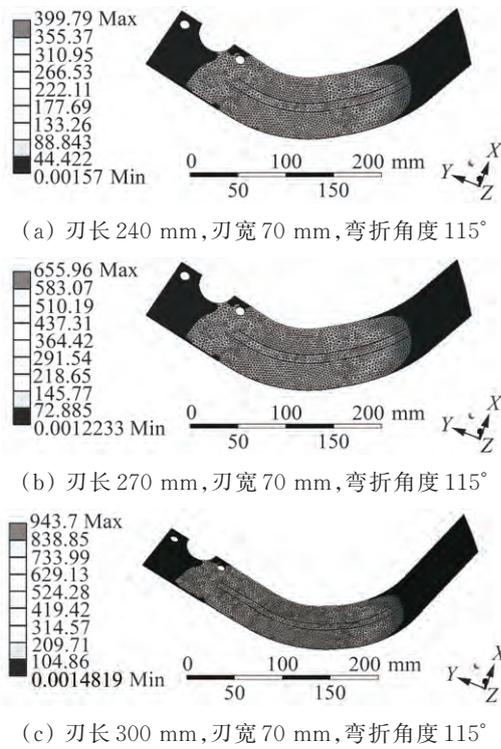


图 11 不同长度弯刀应力图

Fig. 11 Stress diagram of machete with different lengths

固定刃长为 240 mm，弯折角度为 115°，对不同宽度还田弯刀进行静力学分析，其计算结果如图 12 所示。

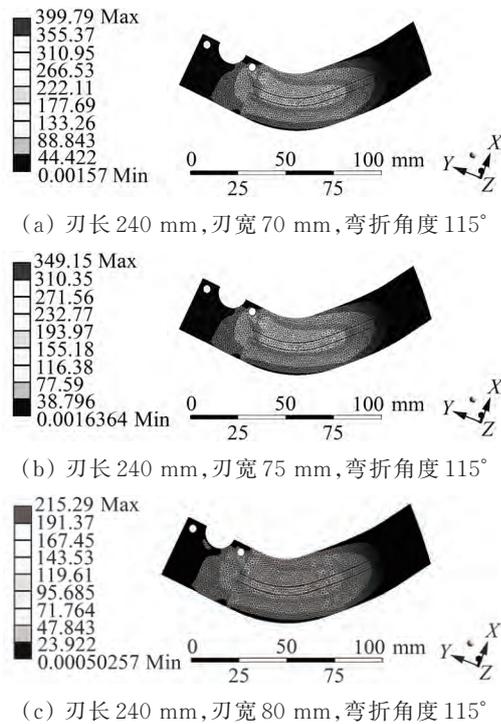


图 12 不同宽度弯刀应力图

Fig. 12 Stress diagram of machete with different widths

取不同宽度 70 mm、75 mm、80 mm 时，应力分别为 399.79 MPa、349.15 MPa、215.29 MPa，可知随刃宽加厚，刀片所受应力减小；且刀片增厚到 80 mm 时应力减小较多，故刃宽选用 80 mm。

对不同弯折角度还田弯刀进行静力学分析，其计算结果如图 13 所示。固定刃长 240 mm，刃宽 70 mm，当弯折角度为 115° 时，最大应力为 399.79 MPa，小于弯折角度为 125°、130° 的最大应力 430.42 MPa、449.97 MPa，由于弯刀断裂都是由最大压强导致，因此选用弯折角为 115° 的弯刀^[18]。

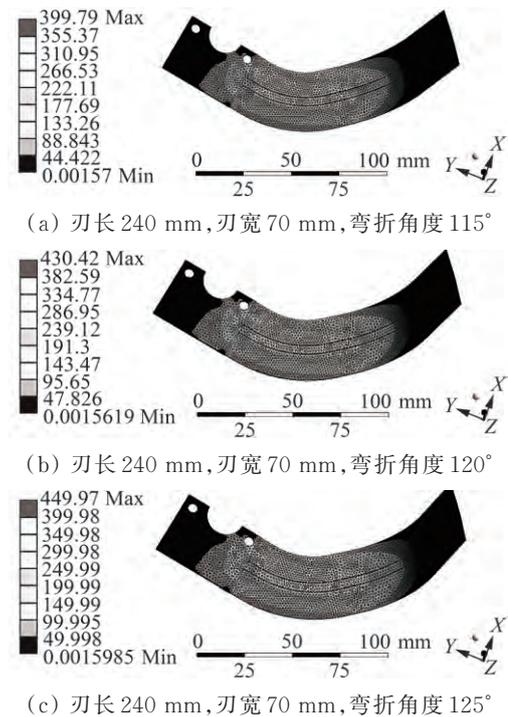


图 13 不同弯折角弯刀应力图

Fig. 13 Stress diagram of different bending angles of machete

3 耕作参数优化试验

根据 2.5 节分析结果，选定弯刀弯折角为 115°、刃宽为 80 mm、刃长为 240 mm，进行耕作参数优化试验。

3.1 试验材料与方法

本文试验选用水稻秸秆长度为 8~15 cm，经测定秸秆剪切模量平均值为 1 MPa，秸秆密度平均值为 301 kg/m³。试验土壤来自三江平原典型黑土区，含水率为 30% 左右、坚实度为 700 kPa，符合旱田试验标准。试验台为自行研制，结构见文献[19]，试验数据采集系统由集流环、SDY210 动态应变仪、示波器、应变片、桥盒、计算机、变频器、天平、开关电源、导线、钢尺、记号笔等组成。刀轴扭矩测量采用全桥贴法，集流环安装位置如图 14 所示。

设 ϵ_{M_t} 和 ϵ_{M_b} 分别代表扭矩应变与弯曲应变，则扭矩

所产生的应变 $\epsilon_{M_1} = \epsilon_M/4$ 。测量系统连接步骤如下:首先将应变片与桥盒相连,随后对动态应变仪进行调平,试验测量数据通过示波器显示并进行存储。



图 14 集流环与安装位置

Fig. 14 Slide ring and its installation position

1.刀轴 2.集流环 3.机架

动态应变仪测试应变 ϵ_{M_1} 用示波器读数,刀轴扭矩计算如式(5)所示。

$$T = W_p \tau_{\max} = \frac{\pi D^3}{16} \cdot \frac{E}{1 + \mu} \cdot \epsilon_{M_1} \quad (5)$$

式中: T ——扭矩, $N \cdot m$;

E ——材料的弹性模量, MPa ;

μ ——材料的泊松比;

D ——轴径, mm ;

τ_{\max} ——最大剪切应力;

W_p ——截面系数。

根据机械设计手册可得 $E = 2.06 \times 10^5 MPa$, 泊松比 $\mu = 0.3$, 轴径为 $23 mm$ 。

根据前期的试验研究,选取弯刀旋耕深度、旋转速度以及单位面积秸秆量为试验因素,采用三因素三水平正交试验,考察刀轴所受扭矩的大小^[20, 21]。因素水平编码表如表 3 所示。

表 3 因素水平编码表

Tab. 3 Factor level coding table

水平	旋耕深度 A /cm	旋转速度 B /($r \cdot \min^{-1}$)	单位面积秸秆量 C /kg
1.682	10	120	1
1	15	180	2
0	20	240	3.5
-1	25	300	5
-1.682	30	340	6

3.2 正交试验结果与分析

采用回归正交旋转试验来探究各因素之间的相互作用关系,试验方案如表 4 所示。 z_1, z_2, z_3 为各因素编码值。通过正交试验方案进行试验,方差分析如表 5 所示。由表 5 可知,模型项 $P \leq 0.05$, 说明 y 与 z_1, z_2, z_3 之间关系为显著,而 $P \leq 0.1$ 时为较显著,其中 A, B, C, A^2, AB 为显著, BC 为较显著,且因素对该指标影响的顺序为: $A > B > C > A^2 > AB > BC$, 其余因素均不显著。采用 Design-Expert 软件进行处理,得到各因素与指标的响应方程如式(6)所示。

$$\hat{y} = 22.92 + 3.85A + 1.13B + 1.07C + 0.50AB - 0.23AC + 0.45BC + 0.30A^2 - 0.22B^2 + 0.05C^2 \quad (6)$$

表 4 试验方案及结果

Tab. 4 Test scheme and results

序号	试验号	z_1	z_2	z_3	扭矩/($N \cdot m$)
1	4	-1	-1	-1	21.5
2	14	1	-1	-1	21.6
3	6	-1	1	-1	21.7
4	19	1	1	-1	19.4
5	10	-1	-1	1	28.1
6	8	1	-1	1	24.6
7	2	-1	1	1	20.6
8	1	1	1	1	15.2
9	5	-1.682	0	0	17.5
10	11	1.682	0	0	18.6
11	17	0	-1.682	0	18.4
12	15	0	1.682	0	18.4
13	7	0	0	-1.682	18.2
14	9	0	0	1.682	13.6
15	16	0	0	0	19.4
16	23	0	0	0	19.4
17	22	0	0	0	19.4
18	21	0	0	0	19.4
19	20	0	0	0	19.4
20	13	0	0	0	17.8
21	12	0	0	0	20.3
22	3	0	0	0	14.8
23	18	0	0	0	19.4

表 5 方差分析表

Tab. 5 Analysis of variance table

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
Model	197.51	9	21.95	59.23	<0.000 1
z_1	71.68	1	71.68	193.45	<0.000 1
z_2	5.93	1	5.93	16	0.001 5
z_3	5.07	1	5.07	13.68	0.002 7
$z_1 z_2$	1.83	1	1.83	4.93	0.044 8
$z_1 z_3$	0.3	1	0.30	0.82	0.382 1
$z_2 z_3$	1.48	1	1.48	3.99	0.067 1
z_1^2	2.57	1	2.57	6.94	0.020 6
z_2^2	1.01	1	1.01	2.74	0.121 9
z_3^2	0.025	1	0.025	0.067	0.799 5
残差	4.82	13	0.37	—	—
失拟项	4.82	6	0.80	—	—
误差	0	7	0.000	—	—
总和	202.33	22	—	—	—

AB 交互作用对扭矩影响的回归方程如式(7)所

示。AB 交互作用的响应曲面如图 15 所示。

$$\hat{y} = 22.92 + 3.85A + 1.13B + 0.50AB + 0.30A^2 \quad (7)$$

由图 15 可知,当耕深较小时,随着弯刀旋转速度增大时,刀辊扭矩基本不变;当耕深较大时,随着弯刀旋转速度增大时,刀辊扭矩先缓慢增大,当旋转速度到达 240 r/min 时,刀辊扭矩开始逐渐趋于稳定。而当转速较小时,随着耕深增加,扭矩也逐渐变大;当转速较大时,随着耕深增加扭矩也随之增加。

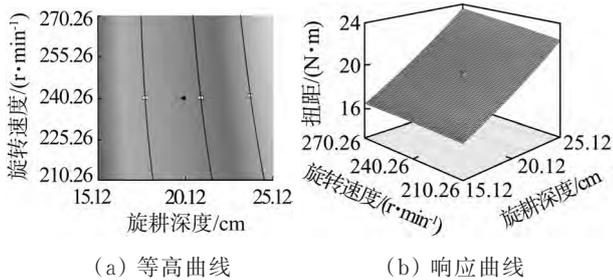


图 15 AB 交互作用下的等高曲线和响应曲面

Fig. 15 Contour curve and response curve under the interaction of AB

BC 交互作用对扭矩影响的回归方程如式(8)所示。BC 交互作用的响应曲面如图 16 所示。

$$\hat{y} = 22.92 + 1.13B + 1.07C + 0.45BC - 0.22B^2 + 0.05C^2 \quad (8)$$

由图 16 可知,当秸秆量较小时,旋转速度增加,刀辊扭矩基本保持不变;当秸秆量较大时,随着旋转速度增加,刀辊扭矩先增长后趋于稳定。当旋转速度较小时,随着秸秆量的增加扭矩保持不变,当旋转速度较大时,随着秸秆量增加扭矩也随之增加。

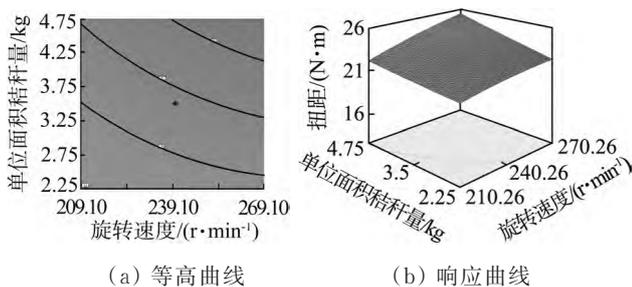


图 16 BC 交互作用下的等高曲线和响应曲线

Fig. 16 Contour curve and response curve under the interaction of BC

综上所述,为了保证耕作深度、减少功率消耗和避免刀辊扭矩过大,机具作业时应在转速适中的位置。由于在试验过程中发现若秸秆量过大,会导致刀辊缠草严重,因此应选择适中的秸秆量。

3.3 耕作参数模型优化

以三个因素为变量,因素的水平范围为约束条件,以扭矩回归方程为响应函数进行模型优化,如式(9)所示。

$$y = 22.92 + 3.85z_1 + 1.13z_2 + 1.07z_3 + 0.50z_1z_2 - 0.23z_1z_3 - 0.45z_2z_3 + 0.30z_1^2 - 0.22z_2^2 + 0.05z_3^2 \quad (9)$$

应用 Design-Expert 软件进行优化求解,得出最优参数,经过换算后得出实际平均扭矩值为 24.14 N·m,即最优参数组合为耕深 20 cm、旋转速度为 240 r/min、单位面积秸秆量为 3.5 kg。在使用本设计提出的旋耕机进行旋耕作业时,若单位秸秆量过多,可使用搂草机等进行预处理以优化旋耕效果;若单位面积秸秆量小于给出参数对旋耕效果无明显影响。

3.4 田间试验验证

试验田地为黑龙江省佳木斯市桦南县曙光农场水稻田地。土壤类型为黑土,水稻秸秆在田间的状态为留茬秸秆和粉碎堆积秸秆覆盖交替,留茬秸秆高度 15 cm 左右,粉碎堆积秸秆高度 18 cm 左右。

数据采集装置由扭矩传感器和数据采集软件组成,动态扭矩传感器一侧连接拖拉机动力输出轴,一侧连接万向节,万向节另一侧连接还田机的变速箱。在每个行程中随机取一点,测量 1 m×1 m 面积内所有未被掩埋的秸秆质量,秸秆掩埋率

$$F = \frac{M_t - M_s}{M_t} \times 100\% \quad (10)$$

式中: F ——秸秆翻埋率,%;

M_t ——耕前单位面积秸秆质量,g;

M_s ——耕后单位面积未被翻埋秸秆质量,g。

为测试优化后的还田机工作性能,选取最优参数组合进行验证性试验,试验重复 5 次,取其平均值为 24.32 N·m,与模型预测值的相对误差为 0.7%,表明优化模型预测可靠。经计算,秸秆翻埋率达 96.8%,秸秆翻埋效果良好。

4 结论

1) 设计自动升降平地装置与菌剂自动精量喷洒装置,并采用 Workbench 2022 R1 对弯刀进行尺寸优化。当刃长为 240 mm、刃宽为 80 mm、折弯角度为 115°时,弯刀应力最小,弯刀切割效果良好。

2) 选取弯刀旋耕深度 A、旋转速度 B 以及单位面积秸秆量 C 为最优耕作参数试验的因素,以刀轴所受扭矩为指标,进行正交旋转试验优化耕作参数,得出因素对指标影响的顺序: $A > B > C > A^2 > AB > BC$,并得到交互作用的响应曲面图以及最优参数组合为耕深 20 cm、旋转速度为 240 r/min、单位面积秸秆量为 3.5 kg。

3) 依据优化耕作参数进行田间验证性试验,得到扭矩平均值为 24.32 N·m,与模型预测值的相对误差为 0.7%,模型可行,且秸秆翻埋率达 96.8%。

参 考 文 献

- [1] 王蕾, 姜昭, 王磊, 等. 黑土区大豆耕地土壤障碍及其对策研究进展[J]. 大豆科技, 2022(1): 27-36.
Wang Lei, Jiang Zhao, Wang Lei, et al. Research progress on soil barriers and their countermeasures in soybean cropland in black soil area [J]. Soybean Science and Technology, 2022(1): 27-36.
- [2] 申屠留芳, 刘涵, 吴旋, 等. 秸秆机械化还田技术及装备研究现状与展望[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(15): 1-6.
Shentu Liufang, Liu Han, Wu Xuan, et al. Research status and prospect of mechanized straw return technology and equipment [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2022, 50(15): 1-6.
- [3] 刘海燕, 孙善文, 韩业辉, 等. 黑龙江省玉米秸秆还田现状及发展策略[J]. 中国种业, 2021(11): 20-22.
Liu Haiyan, Sun Shanwen, Han Yehui, et al. Status quo and development strategy of corn stover return to field in Heilongjiang Province [J]. China Seed Industry, 2021(11): 20-22.
- [4] 王后升. 旋耕刀一埋指组合式秸秆还田机设计与试验[D]. 沈阳: 东北农业大学, 2023.
- [5] 刘熙明, 王滢渺, 田洪涛, 等. 秸秆还田方式与施氮量对秸秆腐解及玉米氮素利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(10): 15-26.
Liu Ximing, Wang Yingmiao, Tian Hongtao, et al. Effects of straw return method and nitrogen application on straw decomposition and corn nitrogen utilization [J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(10): 15-26.
- [6] 张清珠. 仿生几何结构表面土壤镇压辊[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [7] 刘宏俊. 东北丘陵地区播种机镇压装置关键技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- [8] 贾铭钰. 免耕播种机镇压装置的试验研究及计算机辅助设计[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.
- [9] 陈园胜. 液体腐熟剂变量喷施装置的设计与研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.
- [10] 吕世雄. 基于PLC的果园对靶喷药机控制系统设计[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.
- [11] Groeneveld D, Tekinerdogan B, Garousi V, et al. A domain-specific language framework for farm management information systems in precision agriculture [J]. Precision Agriculture, 2021, 22(4): 1067-1106.
- [12] Mohr S, Kühl R. Acceptance of artificial intelligence in German agriculture: An application of the technology acceptance model and the theory of planned behavior [J]. Precision Agriculture, 2021, 22(6): 1816-1844.
- [13] Ammann J, Umstätter C, El Benni N. The adoption of precision agriculture enabling technologies in Swiss outdoor vegetable production: A Delphi study [J]. Precision Agriculture, 2022(23): 1354-1374.
- [14] Nyéki A, Kerepesi C, Daróczy B, et al. Application of spatio-temporal data in site-specific maize yield prediction with machine learning methods [J]. Precision Agriculture, 2021, 22: 1397-1415.
- [15] 李琪璐, 路彤, 李明宇, 等. 基于机器视觉的颜色分拣机器人设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2022, 22(12): 54-57.
Li Qilu, Lu Tong, Li Mingyu, et al. Design of colour sorting robot based on machine vision [J]. Microcontroller and Embedded System Applications, 2022, 22(12): 54-57.
- [16] 何茜. 基于“机器视觉+深度学习”目标检测的皮革表面缺陷检测系统研究[J/OL]. 中国皮革: 1-5[2023-10-29].
- [17] 熊平原, 杨洲, 孙志全, 等. 旋耕刀三向工作阻力试验及作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 51-58.
Xiong Pingyuan, Yang Zhou, Sun Zhiquan, et al. Experiment on three-direction working resistance of rotary cutter and optimization of operating parameters [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(19): 51-58.
- [18] 贾洪雷, 汲文峰, 韩伟峰, 等. 旋耕一碎茬通用刀片结构参数优化试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 45-50.
Jia Honglei, Ji Wenfeng, Han Weifeng, et al. Optimization test of structural parameters of rotary tillage-stubble crushing blade [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 45-50.
- [19] 刘东旭, 葛宜元, 杨传华, 等. 基于离散元法的还田弯刀-秸秆-土壤交互模型仿真与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(4): 1-6.
Liu Dongxu, Ge Yiyuan, Yang Chuanhua, et al. Simulation and experiment on the model of returned bentgrass-straw-soil interactions based on discrete element method [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(4): 1-6.
- [20] 丁艳, 袁栋, 姚克恒, 等. 田间旋耕刀测试试验台设计与应用[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(3): 6-10.
Ding Yan, Yuan Dong, Yao Keheng, et al. Design and application of field rotary plow knife test bench [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(3): 6-10.
- [21] 扈伟昊, 杨发展, 赵国栋, 等. 基于离散元法的立式旋耕刀工作参数分析与优化[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(10): 25-32, 41.
Hu Weihao, Yang Fazhan, Zhao Guodong, et al. Analysis and optimization of working parameters of vertical rotary cutter based on discrete element method [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(10): 25-32, 41.