

双定刀滑切防缠式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验

张喜瑞¹ 杨幼铭¹ 刘宏新² 刘俊孝¹ 张志富¹ 曹 硕¹

(1. 海南大学机电工程学院, 海口 570228; 2. 宿迁学院机电工程学院, 宿迁 223800)

摘要: 针对我国香蕉秸秆粉碎还田作业过程中香蕉秸秆粉碎质量差, 秸秆缠绕堵塞等问题, 设计了一种双定刀滑切防缠式香蕉秸秆粉碎还田机。基于滑切定理, 解析了粉碎刀随轴转动过程中的动态滑切角和粉碎定刀滑切角的相对作用原理, 以等速螺线设计 L 形粉碎定刀刀曲线, 确定了粉碎刀结构参数; 对香蕉秸秆缠绕粉碎刀辊进行受力分析, 设计防缠绕板并确定装配数量与结构参数; 以装置前进速度、粉碎刀辊转速、防缠绕板高度为试验因素, 以香蕉秸秆粉碎合格率、抛撒不均匀度和香蕉秸秆缠绕数量为评价指标进行三因素三水平正交试验, 建立因素与指标的响应面数学模型。试验结果表明, 最优参数组合为作业机前进速度 1.5 m/s、防缠绕板高度 41.6 mm、粉碎刀辊转速 1 800 r/min, 此时香蕉秸秆粉碎合格率为 93.8%, 香蕉秸秆缠绕数量为 26, 香蕉秸秆抛撒不均匀度为 12.1%。以最优组合进行田间试验验证, 试验结果表明双定刀滑切防缠式香蕉秸秆粉碎还田机整机防缠性能优越, 满足设计要求。

关键词: 粉碎还田机; 香蕉秸秆; 双定刀; 滑切角; 防缠

中图分类号: S224.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)02-0036-14

OSID:



Optimal Design and Experiment of Double Fixed Knife Slip-cutting and Anti-tangle Banana Straw Crushing and Returning Machine

ZHANG Xirui¹ YANG Youming¹ LIU Hongxin² LIU Junxiao¹ ZHANG Zhifu¹ CAO Shuo¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Suqian University, Suqian 223800, China)

Abstract: With a large banana growing area in the tropics of China, about 35 million tons of waste straw will be produced each year, and the traditional way of dealing with banana straw is time consuming and polluting. Crushing banana straw back to the field is a green way of dealing with banana straw, and varieties of banana straw crushers have been developed in China. However, the diameter of banana straw in the mature stage can reach 250 mm, banana straw crushing and return machine in the operation of uneven crushing, banana straw fiber entanglement serious, return machine operation quality and other problems still exist. In response to the problem that banana straw is not thoroughly crushed during the operation of banana straw crushing and returning to the field in tropical areas of China, and the straw block is entangled and blocked the key parts, which affects the normal operation of the machine, a double fixed knife slip-cutting type anti-tangle banana straw crushing and returning machine was designed. Based on the slip-cutting theorem, the dynamic slip-cutting angle during the rotation of the crushing knife with the shaft and the slip-cutting angle during the crushing process of the crushing fixed knife were analyzed, the L-shaped crushing fixed knife blade curve was designed according to the equal velocity spiral, and the structural parameters of the crushing knife were determined; the anti-winding plate was designed, the force analysis of the banana straw winding crushing knife roll was performed, and the number of anti-winding plate assembly and structural parameters were determined. The anti-winding plate was designed, the force on banana straw winding crushing knife roller was analyzed, the number of

收稿日期: 2023-06-27 修回日期: 2023-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075137、51965015)、海南省重点研发计划项目(SQ2022XDNY0150)、海南省院士创新平台项目(HD-YSZX-202005、HD-YSZX-202101)和黑龙省“百千万”工程科技重大专项(2020ZX17B01-2)

作者简介: 张喜瑞(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备与农业机器人研究,E-mail: zhangxr@hainanu.edu.cn

通信作者: 刘俊孝(1992—),男,讲师,博士,主要从事热带作物秸秆还田装备研究,E-mail: 995229@hainanu.edu.cn

anti-winding plate assembly and structural parameters were determined; the anti-winding cover was used to improve the anti-winding performance at the knife roller connection; the device forward speed, crushing knife roller speed and anti-winding plate height were taken as test factors for banana straw crushing pass rate, throwing unevenness and the number of banana straw winding as three-level and three-factor orthogonal test, the establishment of factors and indicators of the response surface mathematical model was done, the relationship between factors and evaluation indicators was analyzed, and optimization of the influencing factors was carried out. The experiment results showed that the optimal combination of parameters for each test factor was as follows: the forward speed of the machine was 1.5 m/s, the height of the anti-tangle plate was 41.6 mm, and the speed of the crushing knife roller was 1 800 r/min, and then the banana straw crushing qualified rate was 93.8%, the number of banana straw winding was 26, and the unevenness of banana straw throwing was 12.1%. And the optimal combination of field test verification, with the optimization of the solution results of the error was small; the design of double fixed knife slide cut anti-tangle banana straw crushing machine whole machine anti-tangle performance was superior to satisfy the design requirements.

Key words: straw crushing and returning machine; banana straw; double fixed knife; slip cutting angle; anti-entanglement

0 引言

香蕉是我国南方热区重要经济作物^[1],2021 年我国香蕉种植面积 $3.26 \times 10^5 \text{ hm}^2$,产量约 $1.172 \times 10^7 \text{ t}$,总产量居全球第 2^[2-4],每株成熟香蕉其果实与茎秆比重约为 1:3,每年生产的香蕉秸秆高达 $3.45 \times 10^7 \text{ t}$ ^[5],目前香蕉秸秆大部分由人工砍倒后堆砌自然腐烂,存在人工劳动强度大、污染环境以及增加蕉园病虫害等弊端^[6];机械化粉碎还田作业是一种绿色处理香蕉秸秆的方式。香蕉秸秆平均直径 0.2 m,高度超 2 m,香蕉秸秆纤维粗大、韧性强^[7-8]。机械粉碎还田作业过程中香蕉秸秆粉碎难度大,未彻底粉碎的香蕉纤维极易缠绕机械,影响正常作业,降低机械作业效率^[9-11]。因此,研发防缠式香蕉秸秆粉碎还田机对于香蕉产业发展具有重要意义。

提高粉碎还田机械的作业效率,增强还田机械的防缠性能,主要通过两方面实现:①优化设计香蕉秸秆粉碎还田机械关键部件,加强粉碎还田机械粉碎性能,将香蕉秸秆纤维彻底粉碎^[12-14];王彬等^[15]设计了一种异向双辊式香蕉秸秆粉碎还田机,采用波浪形甩刀切割破碎,通过双辊异向挤压和剪切将香蕉秸秆进行两次粉碎,提高了香蕉秸秆粉碎率;李志强等^[16]设计了一种纵向双辊式香蕉秸秆粉碎还田机,采用动定刀交错排布,香蕉秸秆由卧轴双辊纵向粉碎,增加了粉碎机粉碎香蕉秸秆空间,提高了香蕉秸秆粉碎还田机工作性能。②设计防缠机械结构,避免香蕉纤维缠绕还田机械关键部件;李粤等^[17]设计了一种定甩刀防缠式香蕉秸秆粉碎还田机,通过对 Y 形甩刀和直角定刀的尺寸设计,使香蕉秸秆在粉碎时与 Y 形甩刀及两把直角定刀形成三点支撑,提高了香蕉秸秆粉碎合格率,防缠效果

好;欧忠庆等^[18]设计了一种正反装 U 形甩刀香蕉秸秆粉碎还田机,重新设计刀片尺寸及装配方式,将两把 L 形甩刀组合成倒 U 形,提高了防缠效果,提升了刀具性能,通过改变粉碎刀辊正反转方式,经过两次作业,提高了香蕉秸秆粉碎合格率。上述香蕉秸秆粉碎还田装置虽对部分关键部件进行优化设计,提升了香蕉秸秆粉碎合格率;但装备关于香蕉秸秆粉碎及防缠性能仍有进一步提高空间。

针对香蕉秸秆粉碎难、缠机具等问题,本文设计一种双定刀滑切防缠式香蕉秸秆粉碎还田机,分析粉碎刀具作业时对香蕉秸秆的力学性能和漏割区域,并对粉碎刀片尺寸结构及排列方式进行优化设计;基于缠绕机理设计防缠绕板和防缠绕罩,优化机具防缠性能。通过三因素三水平正交试验,确定结构最佳参数,从而实现香蕉秸秆高效粉碎及防缠绕,以期为南方热区香蕉秸秆粉碎还田机研究提供理论参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

双定刀滑切防缠式香蕉秸秆粉碎还田机,适用于南方热区香蕉林香蕉秸秆粉碎还田;由三点悬挂装置、可调节限深轮、传动装置、粉碎装置、防缠装置、镇压辊、限深轮及外壳组成。传动装置由变速箱、左右传动轴、左右齿轮变速箱组成。防缠装置由防缠绕板和防缠罩组成;粉碎装置主要包括粉碎刀轴、粉碎刀座和 L 形防缠粉碎刀。整机结构如图 1 所示。

1.2 香蕉种植收获农艺标准

海南省位处南方热区,潮湿多雨,是我国香蕉主产区之一,每年 2 月和 9 月种植蕉苗,蕉苗间距一般

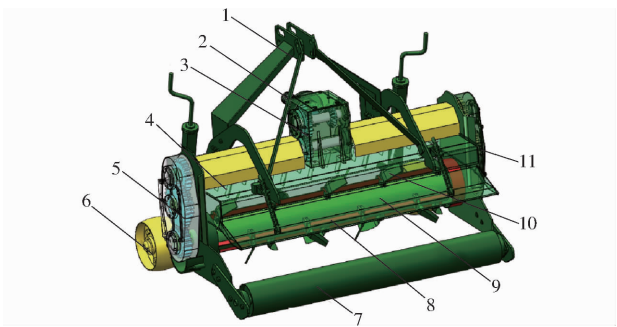


图 1 防缠绕香蕉秸秆粉碎还田机结构示意图

Fig.1 Schematic structure of anti-entanglement banana straw crushing and returning machine

1. 三点悬挂装置 2. 动力输入轴 3. 变速箱 4. 粉碎定刀 5. 左变速箱 6. 限深轮 7. 镇压辊 8. 防缠绕板 9. 粉碎刀辊 10. L 形粉碎定刀 11. 右变速箱

畦宽 2 ~ 2.5 m, 双行植, 株距 2 m, 每公顷种植 1 650 ~ 2 100 株, 每株香蕉秸秆产一串香蕉, 当香蕉采摘后, 需处理蕉园内的香蕉秸秆, 便于下一轮生产^[19-21]; 传统香蕉秸秆粉碎机机械化作业时, 拖拉机前进将香蕉茎秆推弯倒地, 悬挂于拖拉机尾部的粉碎机将倒伏的香蕉秸秆粉碎还田, 如图 2 所示。



图 2 香蕉秸秆粉碎还田机作业示意图

Fig.2 Schematic of banana straw crushing and returning machine

1.3 工作原理与技术特点

在工作过程中, 拖拉机牵引粉碎机前进, 通过后置动力输入轴输入动力驱动粉碎机运转; L 形滑切定刀相对于拖拉机前进方向进行顺时针高速定轴转动, 随着装置前进, 粉碎定刀先将倾斜的香蕉秸秆切断, 配合机壳内定刀将卧倒平铺在地面上的香蕉秸秆捡拾粉碎; 通过控制装置前进速度和设计粉碎刀片外型尺寸减小被粉碎的香蕉秸秆块径向长度, 进而减少粉碎后粉碎室内香蕉秸秆长纤维数量, L 形滑切定刀采用双螺旋排列方式, 从粉碎入口不同位置进入的香蕉秸秆被均匀粉碎, 进一步减少粉碎后粉碎室内香蕉秸秆过长纤维数量; 防缠绕板配合粉碎刀辊, 随粉碎刀运动的秸秆长纤维无法首尾连接, 粉碎的香蕉秸秆随着粉碎刀的运转被抛出, 完成香蕉秸秆粉碎还田作业。

设计的双定刀滑切防缠式香蕉秸秆粉碎还田机具有以下特点: ①多级提升粉碎刀辊转速。双轴传

动, 增加粉碎刀粉碎力度。拖拉机后置动力轴通过变速箱中齿轮组将动力传递给传递轴, 通过左右变速箱内直齿轮组驱动粉碎刀辊运转, 多级增速, 提升 L 形滑切刀对香蕉秸秆的冲击力, 提高香蕉秸秆粉碎合格率。②提升关键部件防缠性能。选择大直径粉碎刀辊, 配合防缠绕板增大刀辊运转过程中扫掠过的回转半径, 增加香蕉秸秆纤维首尾发生缠连长度, 对角防缠绕板将粉碎刀辊对已经缠绕香蕉纤维的均匀作用力集中到 4 个防缠板顶角, 有利于扯断缠绕秸秆; 在作业中缠绕严重的连接轴增设防缠罩, 提高防缠性能。③双滑切粉碎定刀。根据动态滑切角原理设计 L 形滑切防缠定刀刀刃曲线, 滑切定刀配合粉碎, 降低切割阻力, 提高香蕉秸秆粉碎率; 增大粉碎刀滑切角, 使得香蕉秸秆可从粉碎刀刃口滑脱, 提高粉碎刀体防缠性能。

1.4 传动系统

双定刀滑切防缠式香蕉秸秆粉碎还田机采用齿轮组双轴传动; 由拖拉机后置输入轴输入动力, 由变速箱增速经左右传动轴传递给对应左右变速箱, 通过左右变速箱内齿轮组再次增速后驱动粉碎刀辊高速回转, 满足香蕉秸秆粉碎还田机作业要求, 其动力传递示意图如图 3 所示。

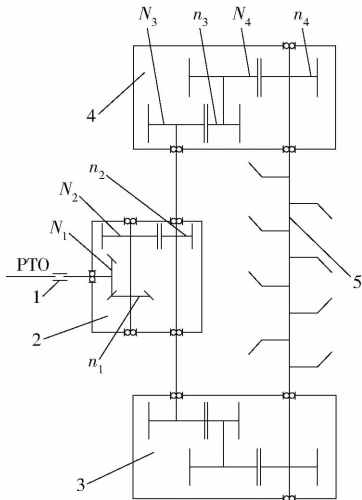


图 3 香蕉秸秆粉碎还田机动力传递示意图

Fig.3 Schematic of power transmission of banana straw crushing and returning machine

1. 动力输入轴 2. 变速箱 3. 右变速箱 4. 左变速箱 5. 粉碎刀辊

输入变速箱的动力经两锥齿轮啮合转变输入轴方向, 从动锥齿轮与主动直齿轮同轴转动, 主动直齿轮驱动从动直齿轮带动传动轴转动; 传递轴左右两端分别与左右变速箱连接, 左右变速箱内部齿轮组结构相同, 经过 3 个直齿轮增速后带动粉碎刀辊转动, 拖拉机后置动力输入轴与粉碎刀辊转速之比计算式为

$$i = \frac{N_1 N_2 N_3 N_4}{n_1 n_2 n_3 n_4} \quad (1)$$

由式(1)计算得 $i = 2.17$, 其中 $N_1 = n_1 = 18, N_2 = 28, n_2 = 18, N_3 = 24, n_3 = 20, N_4 = 30, n_4 = 24$ 。

2 关键部件设计与参数确定

2.1 L形滑切粉碎定刀参数确定

2.1.1 刃口滑切角

香蕉茎秆粗大,由层层秸秆外壳包裹而成,而且香蕉秸秆纤维含量很高,纤维在粉碎刀粉碎冲击后变成絮状长丝,随着装置运转缠绕部件。根据滑切原理^[22],滑切可减少切割能耗,降低切割阻力,选用L形滑切粉碎定刀,径向剖开香蕉秸秆外层,滑动切断香蕉纤维,减少粉碎室内过长纤维数量,改善香蕉秸秆粉碎效果;L形滑切粉碎定刀切割刀体刀片刃口各点滑切角大于香蕉秸秆沿粉碎刀片刃口滑动摩擦角,在机器运转过程中,不能被刀片切断并缠绕粉碎刀体的香蕉纤维能够从刀体刃口滑脱,提高装置防缠性能。

L形滑切粉碎定刀采用65Mn钢,其强度和硬度符合香蕉秸秆粉碎还田作业工况要求;为设计粉碎刀刃口曲线,需先测定香蕉秸秆与粉碎刀片之间滑动摩擦因数,计算香蕉秸秆与粉碎刀片的滑动摩擦角;选取1株外径为150 mm的香蕉茎秆,从最外层至中心按比例选择4层香蕉秸秆块测定其含水率与滑动摩擦因数,如图4所示;在摩擦因数测试仪上分别测定不同层香蕉秸秆滑动摩擦力,重复试验3次,取其平均值;选取各层300 g香蕉秸秆均分3组测定含水率,平均值如表1所示。

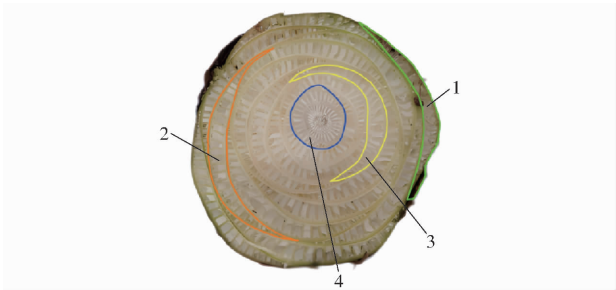


图4 香蕉秸秆横向分层示意图

Fig.4 Schematic of horizontal division of banana straw

1. 第1层 2. 第2层 3. 第3层 4. 第4层

表1 各层香蕉秸秆含水率与滑动摩擦因数

Tab.1 Moisture content and sliding friction coefficient of banana straw in each layer

选取位置	含水率平均值/%	滑动摩擦因数平均值
第1层	87.82	0.349
第2层	93.82	0.270
第3层	94.92	0.264
第4层	96.54	0.256

其滑动摩擦角计算式为

$$\theta_s = \arctan \mu \quad (2)$$

式中 θ_s ——各层滑动摩擦角
 μ ——各层滑动摩擦因数

计算得各层香蕉秸秆与65Mn钢滑动摩擦角分别为 $\theta_1 = 19.24^\circ, \theta_2 = 15.11^\circ, \theta_3 = 14.79^\circ, \theta_4 = 14.36^\circ$, 由表1可得,香蕉秸秆由外向内含水率逐渐增大;最外层香蕉秸秆与65Mn钢滑动摩擦因数最大,所选内3层香蕉秸秆滑动摩擦因数相差不大,香蕉秸秆随体内含水率降低与65Mn钢滑动摩擦因数逐渐增大,表明外层香蕉秸秆在被粉碎后不易滑脱,更容易缠绕粉碎刀片。

粉碎刀刃各点的滑切角为各点速度方向与该点刃口法线之间的夹角,当装置作业前进速度为0时,刀刃绝对速度方向是此时定轴转动线速度方向,此时滑切角为静态滑切角^[23-24],L形滑切粉碎定刀以固定角速度 ω 定轴逆时针转动,装置以速度 v_e 匀速前进,粉碎刀运转绝对速度 v_a 方向为粉碎刀片定轴转动线速度与装置匀速前进速度矢量和,此时滑切角为动态滑切角;选取L形滑切粉碎定刀刃上一点N进行分析,以地面为定参考系,以粉碎刀辊为动参考系进行分析,如图5所示。

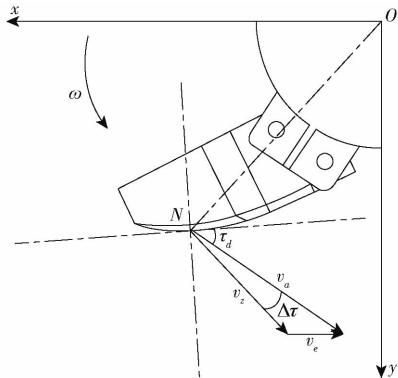


图5 滑切粉碎定刀刃口点N速度分析图

Fig.5 Analysis diagram of N velocity of cutting edge point of sliding cutting and grinding fixed knife

粉碎刀刃口曲线表示为

$$\begin{cases} x = r(\varphi) \sin \varphi \\ y = r(\varphi) \cos \varphi \\ z = z(\varphi) \end{cases} \quad (3)$$

式中 φ ——刃口上任意点与x轴夹角,rad
 r ——刃口上任意点极径,mm

刃口曲线上任意一点 ρ 表示为

$$\rho = r(\varphi) \sin \varphi \mathbf{i} + r(\varphi) \cos \varphi \mathbf{j} + z(\varphi) \mathbf{k} \quad (4)$$

令 $\alpha = \varphi + \omega t$, 参考文献[25],有

$$\tau_d = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{|\omega r r' - v_e r \sin \alpha + v_e r' \cos \alpha|}{\omega r^2 + v_e r \cos \alpha + v_e r' \sin \alpha} \quad (5)$$

式中 τ_d ——L形粉碎刀刃口动态滑切角
 α ——滑切角

装置前进速度改变刀刃口曲线点的绝对速度方向,使得粉碎刀刃动态滑切角比静态滑切角小;其差值夹角为 $\Delta\tau$,如图 5 所示,根据三角函数关系有

$$\begin{cases} v_a^2 = r^2\omega^2 + v_e^2 + 2r\omega v_e \cos\varphi \\ v_e^2 = v_a^2 + r^2\omega^2 - 2v_a r\omega \cos\Delta\tau \end{cases} \quad (6)$$

求解得
$$\Delta\tau = \arctan \frac{v_e}{r\omega} \quad (7)$$

动态滑切角与静态滑切角差值夹角 $\Delta\tau$ 与装置前进速度成正比,与粉碎刀辊转速成反比;粉碎刀刃口点组成刀刃口曲线,确定刀刃口曲线,各点静态滑切角为定值;因此 $\Delta\tau$ 越大,粉碎定刀动态滑切角越小, $\Delta\tau$ 越小,粉碎定刀动态滑切角越大。装置前进速度由拖拉机前进速度决定,香蕉秸秆粉碎还田机作业前进速度为 1 ~ 2 m/s,装置作业时粉碎刀辊转速为 540 ~ 1 000 r/min;选取作业机前进速度 v_e 为 2 m/s,粉碎刀辊转速为 540 r/min。确保装置在低转速、高前进速度作业条件下,能够满足 L 形滑切粉碎定刀滑切条件,达到粉碎刀片不缠绕香蕉秸秆的效果。

L 形滑切粉碎定刀粉碎刀刃口曲线采用等速螺线设计,曲线方程为

$$r = 6.089\,6\varphi + 150 \quad (8)$$

求得 $r' = 6.089\,6\text{ mm}/(^{\circ}) = 348.91\text{ mm}/\text{rad}$,代入式(6)计算求解,设计粉碎刀辊直径大于传统香蕉秸秆粉碎刀辊,粉碎刀辊直径 D 为 180 mm;根据香蕉秸秆粉碎还田作业要求和粉碎刀辊与粉碎刀片配合尺寸,选取 L 形滑切粉碎定刀侧切刃起始点为 150 mm,末端位置为 260 mm,选取 10 个点,计算各点动态滑切角,结果如表 2 所示。

表 2 刀刃曲线各点动态滑切角计算值

Tab.2 Calculated values of dynamic sliding tangent angles at each point of blade curve

序号	极径 R'/mm	侧切刃静态滑切角 $\tau_s/(^{\circ})$	侧切刃动态滑切角 $\tau_d/(^{\circ})$	τ_s 与 τ_d 差值 $\Delta\tau/(^{\circ})$
1	150.0	23.3	19.5	3.8
2	162.2	24.9	21.4	3.5
3	174.4	26.6	23.4	3.2
4	186.6	28.1	25.1	3.0
5	198.8	29.7	26.9	2.8
6	211.0	31.2	28.5	2.7
7	223.2	32.6	30.1	2.5
8	235.4	34.0	31.6	2.4
9	247.6	35.4	33.1	2.3
10	260.0	36.7	34.5	2.2

由表 2 可知,粉碎刀刃口曲线上由安装孔至刀体末端点的滑动摩擦角逐渐增大,即粉碎刀在最接近粉碎刀辊处最易发生缠绕;选取各点的动态滑切

角均大于所测各层香蕉秸秆中最大滑动摩擦角 19.24° ,表明所设计刀刃理论上在作业过程刀刃各点均满足滑切条件,减少粉碎阻力,提升粉碎合格率;作业过程中所缠绕香蕉纤维会随着 L 形滑切粉碎定刀定轴转动而从刀刃滑脱,提高 L 形滑切粉碎定刀防缠效果。

2.1.2 L 形滑切粉碎定刀结构参数

考虑香蕉秸秆茎秆粗大,表层香蕉秸秆韧性强,而甩刀适合粉碎脆性秸秆,因此粉碎刀选择定刀,刀形为 L 形,L 形粉碎定刀参数分别为刀体厚度 10 mm、整体长度 170 mm、最大宽度 80 mm、弯曲半径为 20 mm、螺栓装配孔直径 15 mm、刃角 18° 、刀体弯折角 140° 、刀刃线距离刀尾距离 60 mm,整体结构如图 6 所示。

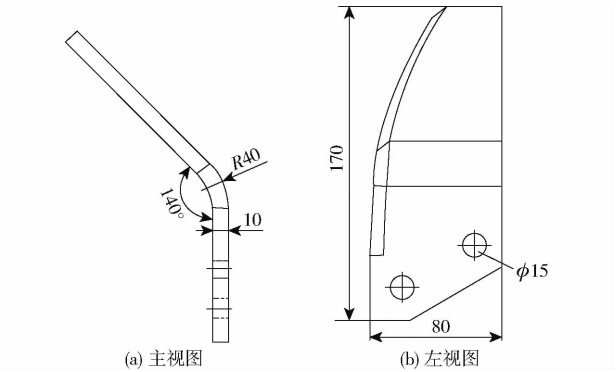


图 6 L 形粉碎定刀结构示意图

Fig.6 L-shaped crushing and fixing knife

2.2 粉碎直定刀滑切角设计

香蕉秸秆粉碎还田机作业时粉碎定刀与回转粉碎定刀形成三点动态支撑粉碎香蕉秸秆,粉碎定刀是配合转动粉碎刀粉碎香蕉秸秆的重要部件,针对香蕉秸秆表层韧性强、难彻底粉碎、缠绕严重等问题设计粉碎定刀,以滑切原理设计粉碎定刀,从而减小香蕉秸秆剪切阻力,提高粉碎定刀防缠性能;粉碎定刀与回转定刀配合,除去两端回转定刀,轴向相邻回转定刀之间配合安装一把粉碎定刀,即粉碎定刀共 16 把分两列按比例安装在粉碎室上侧。

香蕉秸秆粉碎还田机在牵引下直线向前运动,粉碎定刀也以相同前进速度 v_e 匀速直线前进,以装置前进速度方向为 x 轴,以垂直粉碎室上侧板方向为 y 轴,以香蕉秸秆质点 H 为研究对象,对机器作业时质点 H 进行动力学分析,如图 7 所示。

建立香蕉秸秆质点 H 动力学方程

$$\begin{cases} F_N - F_f \cos\alpha = ma_e \cos\alpha \\ F_s - F_f \sin\alpha = m(a_e \sin\alpha - a_r) \\ F_s = F_N \tan\beta \end{cases} \quad (9)$$

式中 F_N ——香蕉秸秆质点 H 受到粉碎定刀的压力,N

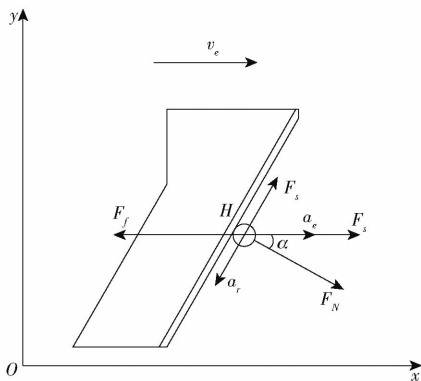


图 7 粉碎定刀滑切示意图

Fig. 7 Schematic of sliding cutting of crushing and fixing knife

F_s ——香蕉秸秆质点 H 受到粉碎定刀刀身的摩擦力, N

F_f ——香蕉秸秆质点 H 受到其他香蕉秸秆的摩擦力, N

a_e ——香蕉秸秆质点 H 牵连加速度, m/s^2

a_r ——香蕉秸秆质点 H 相对加速度, m/s^2

m ——香蕉秸秆质点 H 质量, kg

β ——滑动摩擦角, $(^\circ)$

整理得

$$F_N (\tan \alpha - \tan \beta) = m a_r \quad (10)$$

β 为定值,经摩擦试验机测定 β 为 19.24° ,由式(10)可知,香蕉秸秆质点与粉碎定刀相对滑动的条件为 $a_r > 0$,即 $\alpha > \beta$,因此滑切角设计应大于 19.24° ,考虑香蕉秸秆粉碎效果和粉碎刀身强度等问题,选择粉碎定刀滑切角 α 为 30° ,粉碎定刀长度选择 110 mm ;定刀尾部加宽加强粉碎定刀刀身强度,粉碎定刀(图 8)其他结构参数分别为:刀体宽 45 mm 、刃角 30° 、刀片厚度 5 mm 。

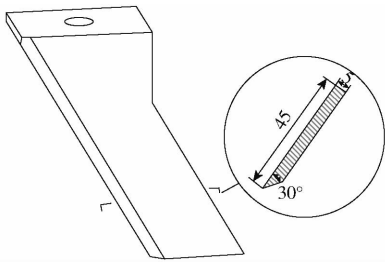


图 8 粉碎定刀结构示意图

Fig. 8 Schematic of crushing and fixing knife structure

2.3 防缠绕板结构设计及参数确定

2.3.1 香蕉秸秆径向粉碎过程

香蕉秸秆粉碎还田作业过程中,拖拉机前进推倒香蕉茎秆,绝大多数香蕉茎秆倒伏方向与装置前进方向相同,香蕉茎秆根部变形弯曲后倒伏,香蕉秸秆粉碎还田机在作业时首先将倒伏的香蕉茎秆从根部切断,在未完全切断香蕉秸秆时,L 形粉碎定刀

捡拾粉碎效果不明显;倾倒香蕉秸秆根部粉碎切断后,剩余部分卧伏在地面上,香蕉茎秆粗大,成熟香蕉茎秆直径为 $150 \sim 200\text{ mm}$,质量为 $50 \sim 60\text{ kg}$,卧轴香蕉秸秆粉碎机在粉碎卧伏在地秸秆部分时,将推倒卧地的香蕉茎秆先径向剖开后再捡拾粉碎;香蕉秸秆质量大,导致前段秸秆粉碎时捡拾粉碎效果不佳。

卧轴刀辊粉碎方式存在漏割区域,漏割区域内香蕉茎秆未经过剖开粉碎过程,经捡拾粉碎后不易彻底粉碎,产生大量过长香蕉秸秆纤维,随着装置运转缠绕关键部件;粉碎刀采用双螺旋排列方式,粉碎受力均匀,装置震动小,选取中间粉碎刀辊上沿刀轴方向两把弯折角方向相反的两把 L 形粉碎定刀切断香蕉秸秆过程进行分析,粉碎刀辊旋转一周半两把 L 形粉碎定刀切割香蕉秸秆切割轨迹如图 9 所示。

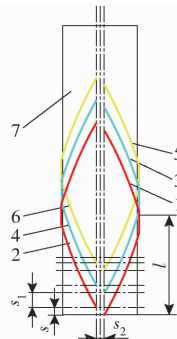


图 9 L 形粉碎定刀径向剖开香蕉秸秆示意图

Fig. 9 Schematic of radial cutting of banana straw with L-type crushing knife

1~6. 同一粉碎区域内 L 形粉碎定刀粉碎旋转一周半切割轨迹 7. 伏地香蕉秸秆

L 形粉碎定刀以双螺旋线方式排列,除去左右两端距离,粉碎定刀不同弯折方向将粉碎刀辊作业区域沿刀轴方向按比例分为 8 个粉碎区域,每个粉碎区域内进行粉碎作业的粉碎定刀为弯折角异向的两把粉碎定刀,粉碎刀辊上沿刀轴方向相近两把弯折角方向相反的 L 形粉碎定刀轴向相隔 $\pi/2$;粉碎装置以速度 v_e 匀速前进,粉碎刀辊转速为 $1\,400\text{ r/min}$,同一粉碎区域内相邻粉碎刀相继粉碎香蕉秸秆间隙期间装置前进距离为

$$s = v_e t = v_e \left(\omega \frac{1}{60} \frac{\pi}{4} \frac{1}{\pi} \right) = \frac{v_e \omega}{240} \quad (11)$$

L 形粉碎定刀转完剩余 $\frac{3\pi}{2}$,装置前进距离为

$$s_1 = v_e t_1 = v_e \left(\omega \frac{1}{60} \frac{3\pi}{4} \frac{1}{\pi} \right) = \frac{v_e \omega}{80} \quad (12)$$

一个粉碎区域在作业过程中按香蕉茎秆喂入方式可分为 4 种类型:香蕉茎秆小于粉碎区域轴向距

离,香蕉茎秆从粉碎区域正中喂入,两把异向 L 形粉碎定刀可将香蕉茎秆完全切断粉碎,如图 10a 所示;香蕉茎秆直径大于粉碎区间轴向距离,香蕉茎秆从粉碎区域正中喂入,经过粉碎区域内粉碎刀切碎后,不能将香蕉茎秆完全切断,需要其他粉碎区域配合粉碎,两区域间存在漏割区间,如图 10b 所示;香蕉茎秆从粉碎区域偏左或偏右位置喂入,香蕉秸秆也无法完全切断,需要相邻粉碎区域配合粉碎,存在漏割区域,如图 10c、10d 所示。

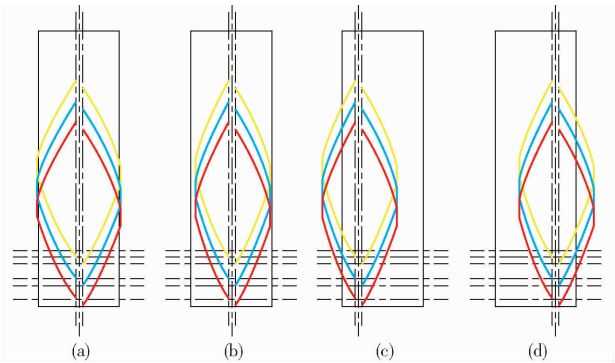


图 10 香蕉秸秆不同剖开粉碎方式

Fig. 10 Different cutting and crushing methods of banana straw

经粉碎刀粉碎切割,如图 11 所示,切下香蕉秸秆块最大长度为

$$l_{AB} = \sqrt{2r_1(R-l_1)+l_1^2}+s+s_1 \tag{13}$$

式中 R ——粉碎定刀刀尖回转半径,m
 r_1 ——香蕉秸秆直径,m
 l_1 ——粉碎刀定刀尖与地面高度,m

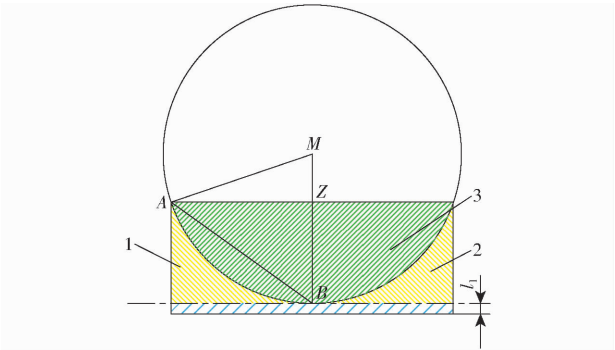


图 11 香蕉秸秆粉碎剖视图

Fig. 11 Sectional view of banana straw crushing

1. 卧伏香蕉秸秆 2. 粉碎刀一次剖切未粉碎区域 3. 粉碎刀粉碎区

切下的香蕉秸秆块经后续捡拾粉碎后抛撒还田,为保证其内香蕉纤维不缠绕粉碎刀辊,应满足切下香蕉秸秆块最大长度小于防缠绕板外端点绕粉碎刀辊定轴转动扫过的距离,即应满足

$$l_{AB} \leq 2\pi(R_s+h) \tag{14}$$

式中 R_s ——粉碎刀辊半径

h ——防缠绕板最低高度

粉碎后香蕉秸秆纤维长度小于防缠绕板作业周长,香蕉纤维无法首尾连接,无法缠绕粉碎刀辊,提高粉碎刀辊防缠性能。

香蕉秸秆粉碎还田机粉碎刀尖不入土,粉碎刀定刀尖与地面有一定高度,在这一高度的香蕉秸秆只经过捡拾粉碎作业过程,粉碎效果不佳,存留未完全粉碎的香蕉秸秆缠绕装置,粉碎刀定刀尖与地面高度为

$$l_1 = h_{rc} - R + R\cos \frac{\pi}{\lambda_r(1+C_v)} \tag{15}$$

式中 h_{rc} ——粉碎刀辊离地高度,m

λ_r ——粉碎刀排数

C_v ——机器前进速度与粉碎刀刀尖速度之比

为提高香蕉秸秆粉碎效果,理论设计应将粉碎刀尖离地高度设计越小越好,计算得粉碎刀定刀尖与地面高度 l_1 为 18.8 mm。

2.3.2 防缠绕板尺寸参数确定

粉碎刀辊是香蕉秸秆粉碎还田机重要工作装置;粉碎过程中香蕉秸秆缠绕粉碎刀辊,影响粉碎还田机工作性能,轴向焊接防缠绕板增大粉碎刀辊径向扫掠长度,将香蕉纤维均匀缠绕粉碎刀辊圆周的作用力集中至各个防缠绕板顶端,增大对缠绕香蕉纤维的作用力,扯断缠绕纤维并甩出,选取平行作业地面为 x 轴,竖直方向为 y 轴,以粉碎刀辊回转轴心为基准点 O 建立直角坐标系,如图 12 所示。

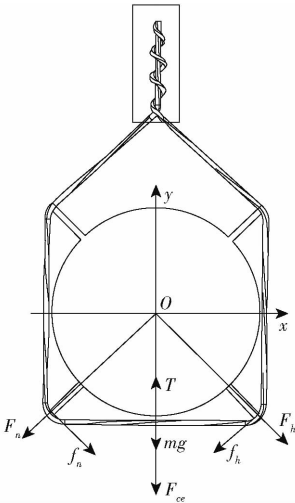


图 12 香蕉秸秆缠绕过程受力分析

Fig. 12 Stress analysis of banana straw winding process

参考文献[26],可得

$$T = Ye^{\mu L_s/R_s} \tag{16}$$

式中 μ ——静摩擦因数

L_s ——缠绕半径

e ——常数

T ——香蕉秸秆纤维缠绕力

Y ——缠绕预紧力

粉碎刀辊发生缠绕后,缠绕半径 L_s 不会发生变化,静摩擦因数 μ 、粉碎刀辊半径 R_s 、香蕉纤维缠绕预紧力 Y 、 e 均为定值,因此香蕉纤维缠绕粉碎刀辊后的缠绕力为定值;选取两防缠板之间的一段缠绕纤维为研究对象,可得

$$\begin{cases} F_Z \cos \theta + F_h \cos \phi + mg + F_{ce} = T + f_h \sin \phi + f_z \sin \theta \\ f_z = \mu F_Z \\ f_h = \mu F_h \\ F_{ce} = m\omega^2 d \\ d = R_s + h \end{cases} \quad (17)$$

式中 F_Z ——缠绕纤维对应防缠板压力
 F_h ——缠绕纤维对右防缠板压力
 f_z ——缠绕纤维对左缠绕板摩擦力
 f_h ——缠绕纤维对右缠绕板摩擦力
 F_{ce} ——缠绕纤维所受离心力
 h ——防缠绕板高度
 d ——缠绕纤维与防缠绕板接触点距回转中心距离

缠绕香蕉秸秆为轻质细长纤维绳,可看作轻质刚体,选取缠绕香蕉秸秆质心位于中心点,根据对两缠绕板之间缠绕香蕉秸秆受力分析,当缠绕香蕉秸秆所受重力 mg 方向与所受离心力方向一致时,缠绕的香蕉秸秆受到的单向外力最大,此时缠绕香蕉秸秆所受径向合力为

$$F_y = F_Z \cos \theta + F_h \cos \phi + mg + F_{ce} - T - f_h \sin \phi - f_z \sin \theta \quad (18)$$

可看作装置以速度 v_e 匀速前进,粉碎刀辊匀速转动,有 $F_Z = F_h$, $f_h = f_z$, $\phi = \theta$,整理可得

$$F_y = 2(1 - \mu) F_h \cos \theta + mg + m\omega^2 d - T \quad (19)$$

对缠绕香蕉秸秆整体进行力学分析,可得

$$\begin{cases} F_Z \cos \theta + F_h \cos \phi + mg + F_{ce} = T + f_h \sin \phi + f_z \sin \theta \\ f_z = \mu F_Z \\ f_h = \mu F_h \\ F_{ce} = m\omega^2 d \\ d = R_s + h \end{cases} \quad (20)$$

$$整理得 \quad F_n = \frac{mg + m\omega^2 d}{2(1 - \mu) \cos \theta} \quad (21)$$

即防缠板对缠绕香蕉秸秆作用力 F_n 与粉碎刀辊转速 ω 成正比,结合式(19),缠绕香蕉秸秆所受的径向合力随粉碎刀辊转速提升而增大, θ 与防缠绕板数量有关,防缠绕板数量多, θ 越小,余弦函数

在 $(0, \frac{\pi}{2})$ 逐渐增大,因此防缠绕板数量越少,缠绕香蕉秸秆所受径向合力越大,则更易扯断缠绕秸秆并甩出;防缠绕板安装高度和数量不能影响装置粉碎还田质量,粉碎刀辊上安装 3 个防缠绕板时,两防缠绕板顶端连线会与粉碎刀辊表面发生干涉,即发生缠绕时香蕉秸秆会与粉碎刀辊大面积接触,增大缠绕香蕉秸秆接触面积,作用应力分散,防缠效果差;粉碎刀辊上安装 5 个防缠绕板时, θ 减小,作业时对缠绕香蕉秸秆径向合力 F_y 减小,且随着防缠绕板数量增加,所增大粉碎刀辊回转周长逐渐减小,因此粉碎刀辊上按比例焊接 4 个防缠绕板时防缠作业性能最佳。

防缠绕板作用是集中香蕉秸秆缠绕应力,增大粉碎刀辊扫掠面积,防缠绕板顶端连线应与粉碎刀辊发生干涉,粉碎刀辊半径 R_s 为 90 mm,则 4 个粉碎防缠绕板最低高度为

$$h_1 = \frac{R_s}{\cos \theta_d} - R_s \quad (22)$$

式中 h_1 ——防缠绕板最低高度, mm
 θ_d ——防缠绕板最短距离与粉碎刀辊接触点夹角,取 45°

计算得防缠绕板最低高度 $h_1 = 37.3$ mm。

避免防缠绕板影响香蕉秸秆粉碎质量,防缠绕板顶端平面应低于或等于粉碎定刀安装后刀刃面最低点,根据装配条件可得防缠绕板最大高度为

$$h_2 = l_s \cos 30^\circ \quad (23)$$

式中 h_2 ——防缠绕板理论最大高度, mm
 l_s ——L 形粉碎定刀与粉碎刀刃距离,取 60 mm

计算得 $h_2 = 51.96$ mm。

2.4 防缠罩参数设计

粉碎刀辊两端连接处存在较小直径连接轴,在作业过程中极易发生缠绕,设计防缠罩增大连接处缠绕周匝长度,提高两端连接处防缠性能;防缠罩由焊接在粉碎刀辊上的防缠圆盘和焊接在机壳上的防缠圈组成,其装配示意图如图 13 所示;防缠圈外径为 311 mm,内径为 303 mm,整体厚度为 4 mm,轴向长度为 90 mm;防缠盘直径为 300 mm,为避免装置作业产生的震动破坏防缠罩配合,防缠圆盘与防缠圈留有 3 mm 装配间隙。

3 田间试验

3.1 试验条件

为验证香蕉秸秆粉碎还田机作业性能,确定关键部件最佳作业参数,参照文献[27],于 2022 年 10 月在海南澄迈试验田进行田间试验(图 14),试验田宽

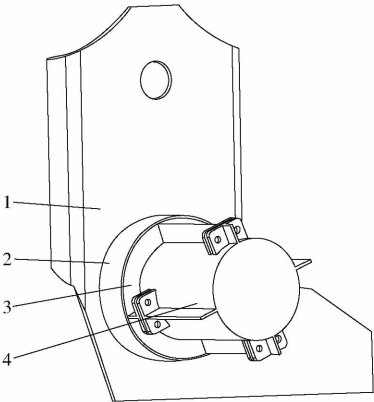


图 13 防缠罩结构示意图

Fig. 13 Schematic of anti-entanglement cover structure

1. 机壳 2. 防缠圈 3. 防缠圆盘 4. 粉碎刀辊

15 m, 长为60 m, 试验田香蕉品种为“宝岛蕉”, 并完成香蕉采摘; 香蕉秸秆粉碎还田机作业时香蕉秸秆生长周期、含水率等特性与人工作业清理香蕉秸秆时相同; 试验田内香蕉秸秆高度为 2 600 ~ 3 200 mm, 根部直径为 150 ~ 210 mm; 试验设备有香蕉秸秆粉碎还田机、东方红 1804 型四驱拖拉机、电子天平、米尺、钢卷尺等; 为验证香蕉秸秆粉碎还田机粉碎性能, 根据五点采样法, 选取作业后 3 个试验区的香蕉秸秆测定秸秆粉碎合格率, 选取装置作业后 6 个试验区测定香蕉秸秆抛撒不均匀度, 作为粉碎性能作业指标; 为验证香蕉秸秆粉碎还田机防缠性能, 采用机具作业前进 60 m 后, 粉碎室内各部件缠绕成条香蕉秸秆总数量作为机具防缠性能的评价指标。



图 14 香蕉秸秆粉碎还田机田间试验

Fig. 14 Field experiment of banana straw crushing and returning machine

采用五点取样法测定作业后香蕉秸秆粉碎合格率。选取试验区长 3 m, 宽 1.8 m, 四角和中心为 0.5 m × 0.5 m 的样品采集区, 在机具作业前进方向按比例选取 3 个试验区, 共计 15 个样品采集区。收集样品采集区内所有香蕉秸秆, 去除杂质, 称量, 计算香蕉秸秆粉碎合格率, 计算式为

$$Y_s = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

(24)

式中 Y_s ——香蕉秸秆粉碎合格率, %
 m_1 ——所有样品采集区内秸秆总质量, g
 m_2 ——样品采集区中长度大于 100 mm 秸秆总质量, g

选取宽为 1 m、长为装置作业幅宽的试验区, 沿装置前进方向均分为 5 个样品采集区, 在往返位置同样设置 5 个样品采集区, 共计 10 个样品采集区, 收集各样品采集区秸秆, 去除杂质, 分别称量, 计算抛撒不均匀度, 计算式为

$$F_b = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{1}{9} \sum_{i=1}^{10} (M_{zi} - \bar{M})^2} \times 100\%$$

(25)

其中 $\bar{M} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} M_{zi}$ (26)

式中 $\bar{M}$ ——测区内各点秸秆平均质量, kg
 F_b ——秸秆抛撒不均匀度, %

选取机具作业前进 60 m 后粉碎室内缠绕条状香蕉秸秆的数量作为装置防缠性能的作业指标; 装置前进 60 m, 清理粉碎室内缠绕香蕉秸秆, 清点数量; 重复进行 3 次, 计算缠绕香蕉秸秆数量平均值, 计算式为

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3}$$

(27)

式中 P ——缠绕装置香蕉秸秆总数量
 $\bar{P}$ ——试验中缠绕装置香蕉秸秆总数平均值

3.2 试验设计

根据前文相关参数分析, 试验选取粉碎刀辊转速、装置前进速度、防缠绕板高度为试验因素; 香蕉秸秆粉碎合格率 Y_1 、香蕉秸秆抛撒不均匀度 Y_2 、香蕉秸秆缠绕数量 Y_3 为试验指标。所选拖拉机后置输出轴转速为 540 ~ 1 000 r/min, 通过机具变速箱变速理论粉碎刀辊转速为 1 171 ~ 2 170 r/min, 试验分别选取粉碎刀辊转速为 1 400、1 600、1 800 r/min; 选取装置前进速度为 1.1、1.5、1.9 m/s, 防缠绕板高度为 31.2、41.6、52.0 mm, 其因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Experimental factors and codes

编码	因素		
	粉碎刀辊转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	前进速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	防缠绕板高度/ mm
-1	1 400	1.1	31.2
0	1 600	1.5	41.6
1	1 800	1.9	52.0

3.3 结果与分析

共进行 17 组, 每组试验 3 次, 结果取平均值, 通过 Design-Expert 13 软件对试验方案进行设计和结果分析, 试验结果如表 4 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为编码值。

表 4 试验方案与结果
Tab.4 Test scheme and results

试验 序号	因素			$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	Y_3
	X_1	X_2	X_3			
1	-1	-1	0	85.30	16.7	45
2	1	-1	0	95.60	12.7	24
3	-1	1	0	81.40	15.2	52
4	1	1	0	94.20	13.4	23
5	-1	0	-1	82.50	17.8	64
6	1	0	-1	96.60	13.8	38
7	-1	0	1	81.30	13.6	28
8	1	0	1	91.40	9.4	16
9	0	-1	-1	89.70	14.6	48
10	0	1	-1	86.30	15.3	52
11	0	-1	1	85.60	10.2	26
12	0	1	1	83.40	11.2	28
13	0	0	0	90.80	12.4	26
14	0	0	0	90.64	13.1	25
15	0	0	0	90.61	12.4	24
16	0	0	0	90.67	12.6	26
17	0	0	0	90.90	11.7	27

利用 Design-Expert 13 对表 4 中的试验结果进行回归拟合^[28]。经 Design-Expert 软件分析后,得到粉碎刀辊转速、装置前进速度和防缠绕板高度方差分析结果如表 5 所示。

对于 $Y_1, X_1, X_2, X_3, X_1X_2, X_1X_3, X_2^2, X_3^2$ 7 个回归项影响极显著, X_2X_3 回归项影响显著;将不显著因素剔除,得到各个因素与 Y_1 的回归方程为

$$Y_1 = 90.72 + 5.91X_1 - 1.36X_2 - 1.67X_3 + 0.625X_1X_2 - X_1X_3 + 0.3X_2X_3 - 1.65X_2^2 - 2.82X_3^2 \quad (28)$$

针对香蕉秸秆粉碎合格率 Y_1 进行响应曲面分析,装置前进速度 X_1 、粉碎刀辊转速 X_2 和防缠绕板高度 X_3 对香蕉秸秆粉碎合格率 Y_1 的交互作用影响如图 15 所示,当装置前进速度确定,随粉碎刀辊转速的增大香蕉秸秆粉碎合格率增大,说明粉碎刀辊转速增加会增加香蕉秸秆单位时间内被粉碎刀捡拾粉碎次数,并且随着转速增加,粉碎刀对香蕉秸秆作用力逐渐增大,造成香蕉秸秆粉碎合格率随粉碎刀辊转速增大而提升。当粉碎刀辊转速固定时,随装

表 5 方差分析
Tab.5 Analysis of variance

方差 来源	香蕉秸秆粉碎合格率 Y_1				香蕉秸秆抛撒不均匀度 Y_2				香蕉秸秆缠绕数量 Y_3			
	平方和	均方和	F	P	平方和	均方和	F	P	平方和	均方和	F	P
模型	370.29	41.14	1 077.77	<0.000 1 **	73.25	8.14	22.66	0.000 2	2 876.68	319.63	54.31	<0.000 1 **
X_1	279.66	279.66	7 325.91	<0.000 1 **	24.50	24.50	68.20	<0.000 1 **	968.00	968.00	164.47	<0.000 1 **
X_2	14.85	14.85	389.04	<0.000 1 **	0.101 3	0.101 3	0.281 9	0.611 9	18.00	18.00	3.06	0.123 8
X_3	22.44	22.44	587.96	<0.000 1 **	36.55	36.55	101.75	<0.000 1 **	1 352.00	1 352.00	229.71	<0.000 1 **
X_1X_2	1.56	1.56	40.93	0.000 4 **	1.21	1.21	3.37	0.109 1	16.00	16.00	2.72	0.143 2
X_1X_3	4.00	4.00	104.78	<0.000 1 **	0.01	0.01	0.027 8	0.872 2	49.00	49.00	8.33	0.023 5 *
X_2X_3	0.36	0.36	9.43	0.018 0 *	0.022 5	0.022 5	0.062 6	0.809 6	1.00	1.00	0.169 9	0.692 5
X_1^2	0.010 7	0.010 7	0.281 3	0.612 3	8.76	8.76	24.39	0.001 7 **	74.27	74.27	12.62	0.009 3 **
X_2^2	11.46	11.46	300.10	<0.000 1 **	1.61	1.61	4.47	0.072 3	161.85	161.85	27.50	0.001 2 **
X_3^2	33.59	33.59	879.93	<0.000 1 **	0.227 6	0.227 6	0.633 6	0.452 2	189.01	189.01	32.11	0.000 8 **
残差	0.267 2	0.038 2			2.51	0.359 2			41.20	5.89		
总和	370.56				75.76				2 917.88			

注:**表示极显著($P<0.01$);*表示显著($P<0.05$)。

置前进速度的增大香蕉秸秆粉碎合格率先增大后减小,说明当机具前进速度过低时,香蕉秸秆喂入量小,秸秆块并未被完全粉碎就被抛撒出机壳;当机具前进速度达到一定值时,秸秆块会在粉碎室内产生动态堆积,有利于粉碎定刀的捡拾粉碎;机具前进速度过大时,单位时间香蕉秸秆喂入量过大,粉碎室内秸秆块不能充分粉碎,香蕉秸秆粉碎合格率降低。当装置前进速度固定时,随防缠绕板高度增大香蕉秸秆粉碎合格率先增大后减小,说明防缠绕板可以将接近粉碎刀尾端的香蕉秸秆块撞开,进入粉碎刀前端粉碎区域,提高粉碎效果,并且防缠绕板随粉

碎刀辊高速旋转,刮撞香蕉秸秆块;当防缠绕板高度达到某一定值,会影响粉碎刀尾端刀刃部分作业,降低粉碎合格率。当粉碎刀辊转速为 1 800 r/min、装置前进速度为 1.5 m/s、防缠绕板高度为 41.6 mm 时,香蕉秸秆粉碎合格率最大。

对于香蕉秸秆抛撒不均匀度 Y_2, X_1, X_3, X_1^2 回归项影响极显著,将不显著因素剔除,得到各个因素与 Y_2 的回归方程为

$$Y_2 = 12.44 - 1.75X_1 + 2.14X_3 + 1.44X_1^2 \quad (29)$$

对香蕉秸秆抛撒不均匀度 Y_2 进行响应曲面分析,装置前进速度 X_1 、粉碎刀辊转速 X_2 和防缠绕

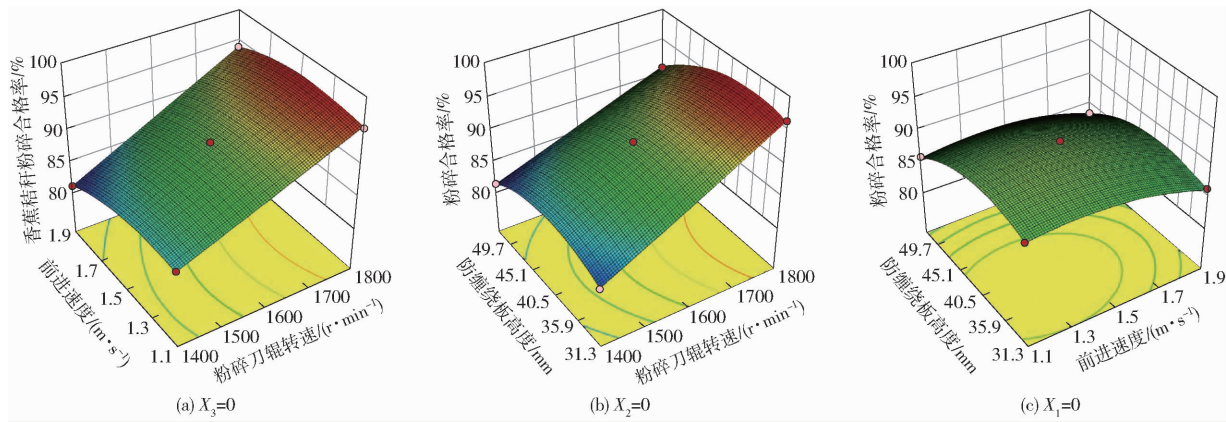


图 15 各因素对香蕉秸秆粉碎合格率影响响应曲面

Fig. 15 Response surfaces of various factors to qualified rate index of banana straw crushing

板高度 X_3 对香蕉秸秆抛撒不均匀度 Y_2 的交互作用影响如图 16 所示。当装置前进速度一定时,随粉碎刀辊转速提升抛撒不均匀度呈逐渐增加趋势,说明粉碎刀辊转速的提升增大了对抛出秸秆作用力,且粉碎也更彻底,降低了抛撒不均匀度;当粉碎刀辊转速固定时,随装置前进速度提升抛撒不均匀度呈逐渐增加趋势,装置前进速度增大,单位时间内秸秆喂入量增大,粉碎室内香蕉秸秆粉碎

不彻底,被成团抛出,造成抛撒不均匀度增大;当粉碎刀辊转速一定时,抛撒不均匀度随防缠绕板高度增大呈逐渐下降趋势,说明随着防缠绕板高度增大,高速旋转的防缠绕板增大粉碎室内风场流速,香蕉秸秆块抛得更散,抛撒不均匀度降低。当粉碎刀辊转速为 1 800 r/min、装置前进速度为 1.5 m/s、防缠绕板高度为 52 mm 时,香蕉秸秆抛撒不均匀度最小。

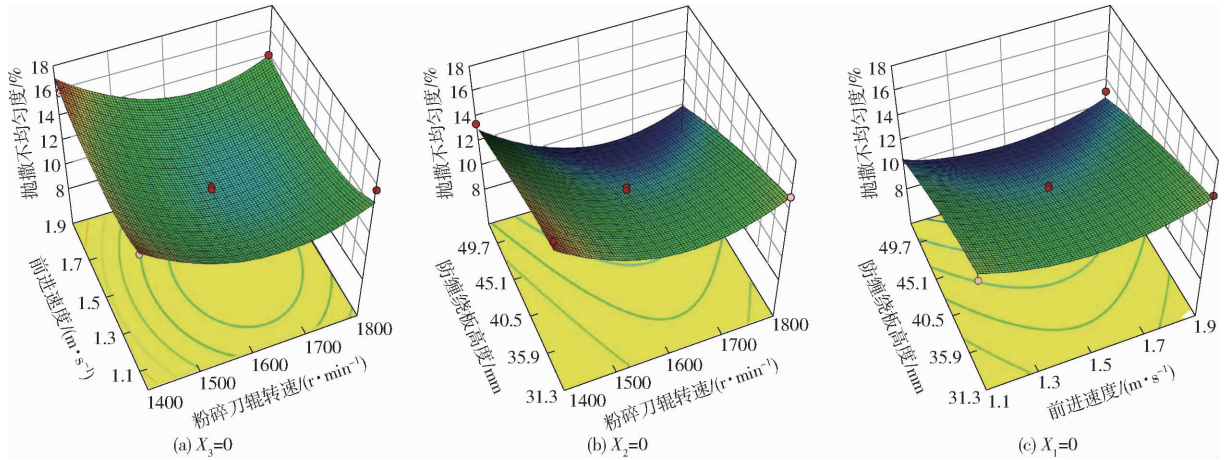


图 16 各因素对抛撒不均匀度影响响应曲面

Fig. 16 Response surfaces to scattered non-uniformity index

对于香蕉秸秆缠绕数量 Y_3 , X_1 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 回归项影响极显著, X_1X_3 回归项影响显著;将不显著因素剔除,得到各个因素与 Y_3 的回归方程为

$$Y_3 = 25.6 - 11X_1 - 13X_3 + 3.5X_1X_3 + 4.2X_1^2 + 6.2X_2^2 + 6.7X_3^2 \quad (30)$$

对香蕉秸秆缠绕数量 Y_3 进行响应曲面分析,装置前进速度 X_1 、粉碎刀辊转速 X_2 和防缠绕板高度 X_3 对香蕉秸秆缠绕数量 Y_3 的交互作用影响如图 17 所示。当装置前进速度一定时,随粉碎刀辊转速提升香蕉秸秆缠绕数量呈先增加后平稳的趋势,说明随着粉碎刀辊转速的提升,香蕉秸秆被粉碎更彻底,粉碎室内能发生缠绕的秸秆长纤维数量逐渐减少,

且缠绕香蕉秸秆所受外力逐渐增大,当增大到某一值后即被扯断甩出,因此秸秆缠绕数量逐渐减少;当粉碎刀辊转速增大至可以将粉碎室内秸秆长纤维减少到某一数量,再提升刀轴转速,粉碎室内秸秆发生缠绕数量变化小,后续变化趋于平缓;当粉碎刀辊转速固定时,香蕉秸秆缠绕数量随装置前进速度增大呈缓慢上升趋势,说明机具前进速度过大,香蕉秸秆粉碎不彻底,发生缠绕概率增大;当粉碎刀辊转速一定时,防缠绕板高度增加香蕉秸秆缠绕数量随呈逐渐下降趋势,说明所设计滑切粉碎刀基本不发生缠绕,缠绕主要发生在粉碎刀辊上,且随着防缠绕板高度增加防缠性能提升。当粉碎刀辊转速为 1 800 r/min、装置前进速度为 1.5 m/s、防缠绕板高

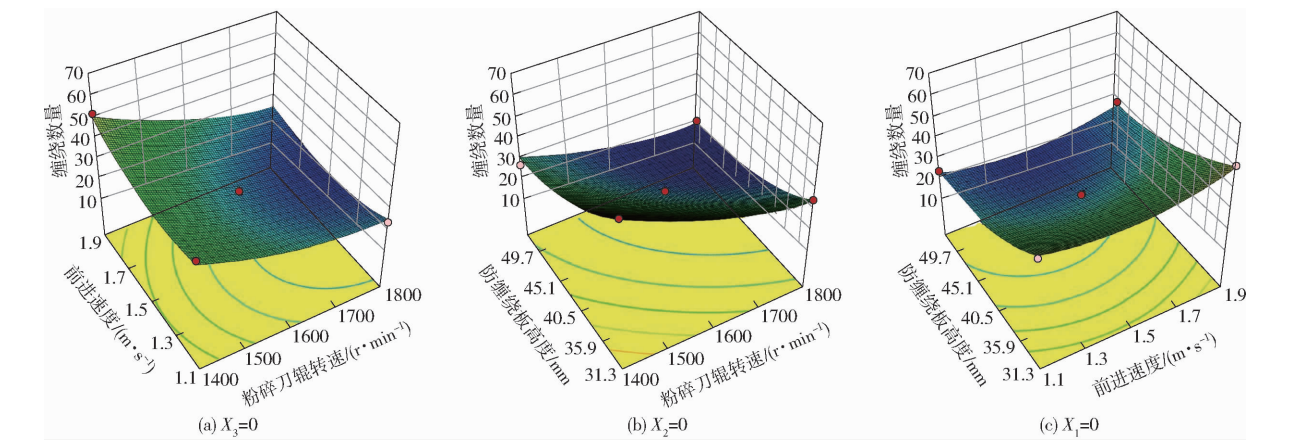


图 17 各因素对香蕉秸秆缠绕数量影响响应曲面
Fig. 17 Exponential response surfaces of banana straw winding quantity

度为 52 mm 时,香蕉秸秆缠绕数量最少。

装置前进速度为 1.3 ~ 1.7 m/s 时,香蕉秸秆粉碎合格率和香蕉秸秆缠绕数量作业指标好,考虑整机作业效率和因装置运动速度过快导致整机震动,选择装置前进速度为 1.5 m/s;随粉碎刀辊转速提升香蕉秸秆粉碎合格率与香蕉秸秆缠绕数量指标都呈上升趋势,选择粉碎刀辊转速为 1 800 r/min;随防缠绕板高度增加香蕉秸秆缠绕数量减少,但防缠绕板高度过大会降低香蕉秸秆粉碎合格率,根据图 17,随着防缠绕板高度增加,香蕉秸秆缠绕数量减少趋势逐渐趋于平缓,因此选择防缠绕板高度为 41.6 mm。为使香蕉秸秆粉碎合格率和装置防缠性能达到最佳状态,其最佳参数组合:作业机前进速度为 1.5 m/s、防缠绕板高度为 41.6 mm、粉碎刀辊转速为 1 800 r/min,此时香蕉秸秆粉碎合格率为 94.2%,香蕉秸秆缠绕数量为 26,香蕉秸秆抛撒不均匀度为 12.4%。

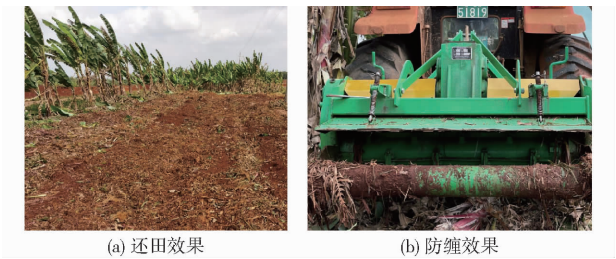


图 18 田间作业效果
Fig. 18 Effect maps of field operation

为验证回归方程的准确性,在作业机前进速度为 1.5 m/s、防缠绕板高度为 41.6 mm、粉碎刀辊转速为 1 800 r/min 的条件下进行田间试验,试验重复 3 次,香蕉秸秆粉碎合格率为 93.8%,香蕉秸秆抛撒

不均匀度为 12.1%,香蕉秸秆缠绕数量为 26,香蕉秸秆粉碎合格率和香蕉秸秆抛撒不均匀度预测值误差分别为 0.42% 和 2.42%,试验证明软件优化合理。如图 18 所示,粉碎室内除了刀辊连接处发生缠绕,其余部件并未发生缠绕,装置防缠性能优越,与优化求解结果差距较小,满足设计要求^[29]。

4 结论

- (1)设计了一种双定刀滑切式防缠香蕉秸秆粉碎还田机,提高香蕉秸秆粉碎合格率,减少粉碎室内长秸秆数量,增大关键部件防缠性能,解决香蕉秸秆粉碎还田机作业机具堵塞、缠绕严重等问题。
- (2)基于滑切原理,分析 L 形粉碎定刀动态滑切角,设计刀刃曲线;对粉碎定刀切割方式受力分析,设计粉碎定刀滑切角,确定 L 形粉碎定刀和粉碎定刀结构参数,降低粉碎阻力,缠绕香蕉秸秆可沿刀刃滑脱效果,提高粉碎刀具防缠性能;对香蕉秸秆缠绕粉碎刀辊进行受力分析,设计防缠绕板,确定防缠绕板安装配合方式和安装数量;设计防缠罩,提高了粉碎刀辊连接处防缠性能。
- (3)以装置前进速度、粉碎刀辊转速和防缠绕板高度为试验因素对香蕉秸秆粉碎合格率、抛撒不均匀度和香蕉秸秆缠绕数量进行三因素三水平正交试验,并对试验结果进行优化,得出最优参数组合:作业机前进速度为 1.5 m/s、防缠绕板高度为 41.6 mm、粉碎刀辊转速为 1 800 r/min,此时,香蕉秸秆粉碎合格率为 93.8%,香蕉秸秆抛撒不均匀度为 12.1%,香蕉秸秆缠绕数量为 26,与优化求解结果相吻合,所设计双定刀滑切防缠式香蕉秸秆粉碎还田机整机防缠性能优越,满足设计要求。

参 考 文 献

[1] 张喜瑞,胡旭航,刘俊孝,等. 香蕉秸秆离散元仿真粘结模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(5): 121 - 130.
ZHANG Xirui, HU Xuhang, LIU Junxiao, et al. Parameter calibration and experiment of banana straw discrete element

- simulation bond model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 121 – 130. (in Chinese)
- [2] 王瑞芳,王竞成,赵东海,等. 香蕉低压过热蒸汽-真空组合干燥研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 392 – 399.
WANG Ruifang, WANG Jingcheng, ZHAO Donghai, et al. Study on low pressure superheated steam – vacuum combination drying of banana[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 392 – 399. (in Chinese)
- [3] 张喜瑞,曾望强,刘俊孝,等. 基于离散元法的砖红壤斜柄折翼式深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 40 – 49.
ZHANG Xirui, ZENG Wangqiang, LIU Junxiao, et al. Design and experiment of tilting handle and folding wing subsoiling shovel for lateritic soil based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 40 – 49. (in Chinese)
- [4] 张海洋,张瑶,李民赞,等. 基于 BSO – SVR 的香蕉遥感时序估产模型研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 98 – 107.
ZHANG Haiyang, ZHANG Yao, LI Minzan, et al. Study on banana yield estimation model based on BSO – SVR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 98 – 107. (in Chinese)
- [5] 张喜瑞,张锐,汝绍锋,等. 海南热区香蕉地预破土凿式深松机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 49 – 55.
ZHANG Xirui, ZHANG Rui, RU Shaofeng, et al. Design and test of pre-breaking soil chisel deep loosening machine in banana field in Hainan Hot area[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(18): 49 – 55. (in Chinese)
- [6] ZHENG Chao, YANG Xiaofei, LIU Kexing, et al. Effects of potassium application and straw returning on potassium management and benefit of banana[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 64: 1511 – 1518.
- [7] LI Yue, WU Zihan, LI Yuan, et al. Design and test of vertical banana straw crushing and returning machine based on piranha tooth structure[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2023, 46: 591 – 600.
- [8] DENG Qinghua, ZHANG Jian, XIAO Ping, et al. Methane production kinetics in the combination of high temperature thermal hydrolysis pretreatment and anaerobic co-digestion for municipal sludge and banana straw[J]. Desalination and Water Treatment, 2020, 198: 307 – 313.
- [9] BARUAH J, BARDHAN P, MUKHERJE E, et al. Integrated pretreatment of banana agrowastes: structural characterization and enhancement of enzymatic hydrolysis of cellulose obtained from banana peduncle[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 201: 298 – 307.
- [10] 杨洲,欧治武,孙健峰,等. 基于香蕉根系分布特征的变量施肥机研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 1 – 10.
YANG Zhou, OU Zhiwu, SUN Jianfeng, et al. Development of variable fertilizer machine based on banana root distribution[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(8): 1 – 10. (in Chinese)
- [11] 宋帅帅,段洁利,邹湘军,等. 基于香蕉根系分布形态的变量排肥器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 11 – 18.
SONG Shuaishuai, DUAN Jieli, ZOU Xiangjun, et al. Parameter optimization and experiment of variable fertilizer based on banana root distribution[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 11 – 18. (in Chinese)
- [12] 张喜瑞,王自强,李粤,等. 滑切防缠式香蕉秸秆还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 26 – 34.
ZHANG Xirui, WANG Ziqiang, LI Yue, et al. Design and experiment of slip-cut and anti-entanglement banana straw returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 26 – 34. (in Chinese)
- [13] 刘鹏,何进,李艳洁,等. 异速对辊式玉米秸秆粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 69 – 79.
LIU Peng, HE Jin, LI Yanjie, et al. Design and test of different speed counter-roller type corn straw crushing and returning device[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(14): 69 – 79. (in Chinese)
- [14] 贾洪雷,谭贺文,马中洋,等. 玉米收获机断秸导流装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 12 – 23.
JIA Honglei, TAN Hewen, MA Zhongyang, et al. Design and test of straw breaking diversion device for corn harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(4): 12 – 23. (in Chinese)
- [15] 王彬,于云峰,张喜瑞. 异向双辊式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(2): 6 – 12.
WANG Bin, YU Yunfeng, ZHANG Xirui. Design and test of counter-directional double-roller banana straw grinding and returning machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(2): 6 – 12. (in Chinese)
- [16] 李志强,李粤,贺宁波,等. 纵向双辊式香蕉秸秆粉碎还田机的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(3): 180 – 184.
LI Zhiqiang, LI Yue, HE Ningbo, et al. Design and test of longitudinal double-roll banana straw crushing and returning machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(3): 180 – 184. (in Chinese)
- [17] 李粤,郭超凡,姚德宇,等. 定甩刀防缠式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 11 – 19.
LI Yue, GUO Chaofan, YAO Deyu, et al. Design and experiment of anti-entanglement banana straw crushing and returning machine with fixed swinging knife[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(18): 11 – 19. (in Chinese)
- [18] 欧忠庆,张园,刘智强,等. 正反颠倒 U 型甩刀香蕉茎秆粉碎还田机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(12): 80 – 84.
OU Zhongqing, ZHANG Yuan, LIU Zhiqiang, et al. Design and test of banana stalk crushing and returning machine with

inverted u-shaped throwing knife[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(12):80–84. (in Chinese)

[19] 熊俊涛,廖世盛,梁俊浩,等. 基于本体与认知经验的农业机器人视觉分类决策方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 208–215.

XIONG Juntao, LIAO Shisheng, LIANG Junhao, et al. Visual classification decision-making method for agricultural robots based on ontology and cognitive experience[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 208–215. (in Chinese)

[20] 付根平,杨宇宇,张世昂,等. 香蕉园机器人导航的激光与超声波组合测距方法研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 159–168.

FU Genping, YANG Chenyu, ZHANG Shiang, et al. Research on laser and ultrasonic combined ranging method for robot navigation at banana plantation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021, 52(5): 159–168. (in Chinese)

[21] 黄平明,莫海港,张英俊,等. 香蕉种植园土壤管理防控枯萎病的研究进展[J]. 农业研究与应用,2021,34(4):50–53.

HUANG Pingming, MO Haigang, ZHANG Yingjun, et al. Research progress on soil management and prevention and control of fusarium wilt in banana plantation[J]. Agricultural Research and Application,2021,34(4):50–53. (in Chinese)

[22] 周华,张文良,杨全军,等. 滑切型自激振动减阻深松装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(5):71–78.

ZHOU Hua, ZHANG Wenliang, YANG Quanjun, et al. Design and test of sliding-cut self-excited vibration drag reduction deep loosening device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):71–78. (in Chinese)

[23] 刘鹏,何进,娄尚易,等. 异速圆盘动态支撑式玉米秸秆粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):41–50.

LIU Peng, HE Jin, LOU Shangyi, et al. Design and experiment for dynamic supporting type maize straw chopping retention device with different rotation speeds of disc blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 41–50. (in Chinese)

[24] 康峰,仝思源,张汉石,等. 苹果枝条往复切割剪枝参数分析与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(16):9–16.

KANG Feng, LUO Siyuan, ZHANG Hanshi, et al. Analysis and experiment on parameters of reciprocating cutting of Apple branches[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(16):9–16. (in Chinese)

[25] 张鑫. 水稻秸秆反旋深埋还田装置优化设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2021.

ZHANG Xin. Optimal design and experimental study on counter-rotating deep burying device of rice straw[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2021. (in Chinese)

[26] 徐良,肖宏儒. 茶园中耕机械缠草机理分析[J]. 中国农机化学报,2015,36(2):25–28.

XU Liang, XIAO Hongru. Analysis on the mechanism of grass entanglement in tea garden[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2015,36(2):25–28. (in Chinese)

[27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 保护性耕作机械 秸秆粉碎还田机:GB/T 24675.6—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.

[28] 徐中儒. 回归分析与试验分析[M]. 北京:中国农业出版社,1998.

[29] 农业部农业机械试验鉴定总站. 农业机械试验条件 测定方法的一般规定:GB/T 5262—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.