

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.003

六头螺旋秸秆还田耕整机刀辊设计与试验

张春岭^{1,2} 夏俊芳^{1,2} 张居敏^{1,2} 周 华^{1,2} 祝英豪^{1,2} 王金武³(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;
3. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对长江中下游两熟制地区土壤黏重板结, 传统秸秆还田耕整机作业质量不理想、刀辊易缠绕和功耗大等问题, 提出了一种六头螺旋秸秆还田耕整机刀辊。基于滑切原理设计了等滑切角二次切刀, 阐述了刀辊结构及工作原理, 分析了二次切刀减阻程度及主要作业参数。田间试验结果表明: 各因素对功耗和秸秆掩埋率影响显著性由大到小分别为刀辊转速、耕深、作业速度和耕深、作业速度、刀辊转速, 对秸秆粉碎率和碎土率影响显著性由大到小为刀辊转速、作业速度、耕深, 通过软件分析得到最优参数组合为: 耕深 12.7 cm, 作业速度 0.7 m/s, 刀辊转速 273 r/min。验证试验结果表明: 最优参数组合下六头螺旋秸秆还田耕整机功耗、秸秆掩埋率、秸秆粉碎率和碎土率分别为 31.9 kW、93.1%、87.5% 和 78.3%, 与软件预测值之间的误差分别为 4.7%、1.4%、1.9% 和 2.6%。对比试验结果表明: 六头螺旋秸秆还田耕整机功耗和秸秆掩埋率较水旱两用秸秆还田耕整机分别低 8.8% 和 2.3%, 秸秆粉碎率和碎土率分别高 3.0% 和 6.1%。

关键词: 秸秆还田耕整机; 六头螺旋; 二次切刀; 刀辊

中图分类号: S222.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)03-0025-10

Design and Experiment of Knife Roller for Six-head Spiral Straw Returning Cultivator

ZHANG Chunling^{1,2} XIA Junfang^{1,2} ZHANG Jumin^{1,2} ZHOU Hua^{1,2} ZHU Yinghao^{1,2} WANG Jinwu³

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Reaches of Yangtze River,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

3. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The soil in the middle and lower reaches of the Yangtze River is sticky and hard. The quality of traditional straw returning tillage machine is not ideal, and the knife roller is easy to be twisted and the power consumption is large. To solve the above problems, a six-head spiral straw returning cultivator's knife roller was proposed. Secondary cutter blade was designed, and the structure of knife roller and working principle were illustrated. The reduction degree of the secondary cutter blade and the major working parameters were analyzed. The results of experiment showed that the influence of factors on power consumption and straw burial were significant, which from large to small were rotating speed of knife roller, tillage depth, working speed and tillage depth, working speed and rotating speed of knife roller, respectively. The influence of factors on straw crushing and soil pulverization were significant, which from large to small were rotating speed of knife roller, working speed and tillage depth. The optimum value of tillage depth, working speed and rotating speed of knife roller were 12.7 cm, 0.7 m/s and 273 r/min, respectively. The results of verification experiment showed that the power consumption, rate of straw burial, rate of straw crushing and soil pulverization were 31.9 kW, 93.1%, 87.5% and 78.3% when working on the optimum values. The errors between the predicted values were 4.7%, 1.4%, 1.3% and 5.8%, respectively. The results of contrast experiment showed that the power consumption and the rate of straw burial of six-head spiral straw returning cultivator were 8.8% and

收稿日期: 2018-08-23 修回日期: 2018-12-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301303)和公益性行业(农业)科研专项(201503136)

作者简介: 张春岭(1989—),男,博士生,主要从事现代农业装备设计及测控研究,E-mail: ZCL1583967592@163.com

通信作者: 夏俊芳(1963—),女,教授,主要从事现代农业装备设计及测控研究,E-mail: xjf@mail.hzau.edu.cn

2.3% lower than that of cultivator for straw returning in paddy field and dry land, respectively. However, the rate of straw crushing and soil pulverization were 3.0% and 6.1% higher than that of the latter. The research results can provide reference for the design and improvement of straw returning tillage machine in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Key words: straw returning cultivator; six-head spiral; secondary cutter blade; knife roller

0 引言

机械化秸秆埋覆还田是将农作物收获后的秸秆粉碎并埋入土壤,之后秸秆自然分解并腐殖化,不仅增加土壤肥力,改善土壤结构,提升土壤保水、保墒能力,还可提高农业生产效率^[1-5]。作为机械化秸秆埋覆还田主要机具之一,秸秆还田耕整机的关键部件设计和刀片排列方式对作业质量和功耗有着显著影响^[6-9]。

目前,国内外对秸秆还田耕整机关键部件设计和刀片排列方式已有相应的研究并取得了一定的研究成果^[10-14]。传统秸秆还田耕整机作业质量不理想,且刀轴易缠草。国内相关学者根据不同作物耕、播农艺要求设计了相应的秸秆还田耕整机^[15-18]。夏俊芳等^[19-21]设计了一种螺旋横刀,并通过螺旋横刀、旋耕刀和弯刀等在刀轴上的合理排列设计了多种秸秆还田耕整机,试验分析表明应用螺旋横刀的秸秆还田耕整机不仅提高了作业性能,也解决了刀轴易缠草的问题,但功耗较大。

本文针对长江中下游两熟制地区土壤黏重板结,现有秸秆还田耕整机作业质量不理想、刀辊易缠草和功耗大等问题,设计一种等滑切角二次切刀,进一步提出一种六头螺旋秸秆还田耕整机刀辊,在满足作业性能要求下降低功耗,并通过田间试验分析主要影响因素对作业性能和功耗的影响显著性,为长江中下游两熟制地区秸秆还田耕整机设计与改进提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构和刀辊结构

六头螺旋秸秆还田耕整机结构如图1所示,主要由三点悬挂装置、变速箱、机架、左刀辊、右刀辊和托板等装置组成。其刀辊(以左刀辊为例)结构如图2所示,主要由刀轴、旋耕刀和二次切刀等部件组成。整机刀辊分为左刀辊和右刀辊两部分,两刀辊关于变速箱输入轴轴线所在竖直平面结构对称,以减小左右刀辊受力不平衡给轴承带来的损坏和机具振动。旋耕刀以四头螺旋线沿圆周方向均匀排布,二次切刀和旋耕刀沿轴向方向交替出现,组成六头螺旋秸秆还田耕整机刀辊。

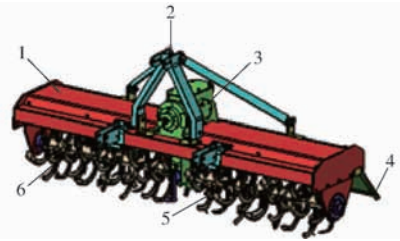


图1 六头螺旋秸秆还田耕整机结构图

Fig.1 Schematic of six-head spiral straw returning cultivator

1. 机架 2. 三点悬挂装置 3. 变速箱 4. 托板 5. 右刀辊
6. 左刀辊



图2 六头螺旋秸秆还田耕整机刀辊结构图

Fig.2 Schematic of six-head spiral straw returning cultivator's knife roller

1. 旋耕刀 2. 二次切刀 3. 刀轴

1.2 工作原理与技术参数

整机通过三点悬挂装置安装于拖拉机后方。作业时,动力由拖拉机输出轴输出,经齿轮箱变速后分别输送到左刀辊和右刀辊,左、右刀辊均为正向旋转,转速相同。基于课题组前期研制的水旱两用秸秆还田耕整机刀辊旋耕埋草原理^[20-21],本设计刀辊在作业时,旋耕刀和二次切刀交替入土,切割秸秆并切削土壤。在刀辊快速旋转作用下,同一条螺旋线上正切刀相向排列的旋耕刀形成封闭圆柱体状,将秸秆埋入土壤并防止刀轴被秸秆或杂草等缠绕。少量秸秆滑离旋耕刀后被下一刻运动而来的二次切刀切断,从而提高秸秆粉碎率。二次切刀运动于两把旋耕刀之间,还起到防止旋耕刀夹土、降低旋耕刀切土阻力的作用。根据课题组前期研制的水旱两用秸秆还田机技术参数^[20-21]和本文对关键部件设计结果,整机主要技术参数如表1所示。

2 关键部件设计

2.1 等滑切角二次切刀设计

(1) 刀片刀口曲线方程的建立

作业时,等滑切角二次切刀(简称二次切刀)一

表1 六头螺旋秸秆还田耕整机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of six-head spiral straw returning cultivator

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 600×750×750
整机质量/kg	450
配套动力/kW	59.2~73.4
作业幅宽/mm	2 300
作业速度/(m·s ⁻¹)	0.5~1.2
刀辊转速/(r·min ⁻¹)	250~320
旋耕刀数量/把	72
二次切刀数量/把	36

方面切割土壤表面秸秆和土壤内部根茬,同时撕裂土壤,减小旋耕刀作业阻力;另一方面,二次切刀可以对沿旋耕刀正切刀滑出的秸秆进行二次切割,从而提高秸秆粉碎率。由于稻-油、稻-麦两熟区中水稻秸秆韧性大,易缠绕,且生长土壤较粘湿,传统旋耕刀不易切断秸秆,而二次切刀对前一时刻旋耕刀未切断的秸秆可以进行第二次切割,因此称为二次切刀。结合秸秆还田刀片已有研究成果^[22-23],本设计的二次切刀刃口曲线采用等角(静态滑切角)螺旋线。

二次切刀刃口曲线示意图如图3所示, M 为刃口曲线上任意一切割点,坐标轴 OX 正方向为机具前进方向, OY 正方向为刀轴重心方向。当刀片绕刀轴中心 O 以角速度 ω 由任意初始角 θ 转过 $d\theta$ 时, M 点变到 M' 点,极径由 r 变成了 r' ,增加了 dr 。如果 dr 趋近于0,则弧线 MM' 可近似为直线,其弧长和直线 MN 长度相等。由滑切角定义^[23]可得

$$\tan\tau = \frac{l_{M'N'}}{l_{MN}} = \frac{rd\theta}{dr} \quad (1)$$

式中 τ ——滑切角, ($^\circ$)

本设计二次切刀静态滑切角为常数,令其为 C_0 ,即 $\tan\tau = C_0$ 。将其代入式(1)整理后可得

$$r = Ce^{\theta \cot\tau} \quad (2)$$

式中 C ——积分常数

参考已有研究^[24]并结合课题组前期对韧性较

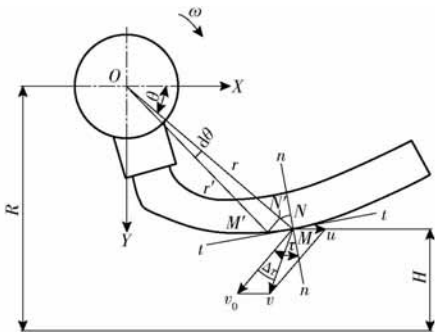


图3 二次切刀刃口曲线示意图

Fig.3 Diagram of secondary cutter blade edge curve

大的水稻茎秆切割力学试验分析,本设计选取静态滑切角为 50° 。依据 GB/T 5669—2008《旋耕机械刀和刀座》对刀片初始入土半径设计要求并减少材料的使用,设计刀片刃口起始处极径为105 mm。根据小麦播种以及油菜和水稻直播深度要求^[25-26],结合 GB/T 5668—2008《旋耕机》对旱耕耕深的规定,耕深大于8 cm即可满足小麦播种和油菜直播相应农艺要求,但当秸秆埋覆深度在10 cm以下时,可以明显提高土壤温度和蓄水能力^[27]。考虑到二次切刀作用,取其最大旋转半径为210 mm,较旋耕刀最大旋转半径大5 mm;刃口起始处极角取 54° 。将刀片刃口起始处极径和极角代入式(2)可求得 $C = 47.73$,因此等滑切角二次切刀刃口曲线方程为

$$r = 47.73e^{\theta \cot 50^\circ} \quad (3)$$

(2) 二次切刀动态滑切角分析

对静态滑切角的分析并未考虑机具行驶速度,但实际中机具行驶速度对滑切角影响很大,不可忽视。如图3所示,静态滑切角与动态滑切角的差值 $\Delta\tau$ 可表达为

$$\tan\Delta\tau = \frac{u \cos(\omega t)}{R\omega - u \sin(\omega t)} \quad (4)$$

式中 u ——机具前进速度, m/s

t ——运动时间, s

R ——最大旋耕半径, mm

由图3几何关系可得

$$\sin(\omega t) = \frac{R-H}{r} \quad (5)$$

$$\cos(\omega t) = \sqrt{1 - \left(\frac{R-H}{r}\right)^2} \quad (6)$$

联立式(4)~(6)可解得

$$\Delta\tau = \arctan \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{R-H}{r}\right)^2}}{\lambda - \sqrt{1 - \left(\frac{R-H}{r}\right)^2}} \quad (7)$$

其中

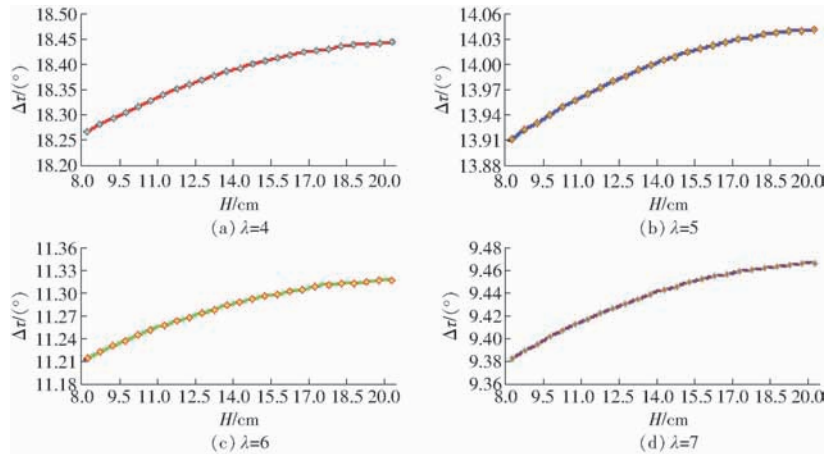
$$\lambda = R\omega/u$$

式中 H ——耕深, mm

λ ——旋耕速比

由式(7)可得, r 越大,即越靠近刀尖处,动态滑切角受影响越小,即只要刃口起始处动态滑切角满足秸秆不缠绕的要求,其余各处均满足。因此,下面仅分析刃口起始处动态滑切角。目前常用旋耕速比为4~10^[28],但旋耕速比过大会增加刀辊转速或降低作业速度,从而导致功耗的增大或作业效率的降低,本设计旋耕速比初始选为4~7。

图4为二次切刀刃口起始处在不同旋耕速比时 $\Delta\tau$ 随耕深 H 的变化关系。由图可得,随着旋耕速

图4 不同旋耕速比时 $\Delta\tau$ 随 H 变化曲线Fig. 4 Relationship curves between $\Delta\tau$ and H at different rotational speed ratios

比 λ 的增加, $\Delta\tau$ 逐渐减小, 即滑切角变化减小, 有利于刀片的滑切。不同旋耕速比下, $\Delta\tau$ 随耕深 H 的增大而增大, 但变化幅度较小。当 $\lambda = 4$ 时, $\Delta\tau$ 值较大, 均大于 18° , 不利于刀片刃口滑切, 所以本设计旋耕速比范围缩减为 $5 \sim 7$ 。

2.2 刀片排列方式设计

本设计刀辊中左刀辊和右刀辊呈对称结构, 两者使用的刀片及刀片排列方式完全相同, 仅刃口方向相反, 因此下面以左刀辊为对象进行分析。

旋耕刀排列基本原则: 刀片按多头螺旋线方式排列; 同一条螺旋线上相邻两把刀片正切刃方向相反; 避免同一刀辊上同向刀片相继入土, 以减少机具振动和轴向力。二次切刀排列基本原则: 刀片按多头螺旋线方式排列, 螺旋线头数是旋耕刀排列螺旋线头数的一半; 每把刀片在正切刃同向的相邻两把旋耕刀之间, 并相差一个相位角。

图5为刀辊左端主视图及其左视图。如图5a所示, 轴向方向上, 同一螺旋线上正切刃相向的两把相邻旋耕刀在刀轴旋转作用下形成类似圆柱体状, 相邻两把旋耕刀刀座内侧间距 m 不能过大; 若 m 过小, 则容易夹土。依据国标旋耕刀 II245 作业宽度, m 取值 100 mm 。二次切刀位于两旋耕刀中间位置, 刀座厚度为 22 mm , 因此旋耕刀刀座与相邻二次切

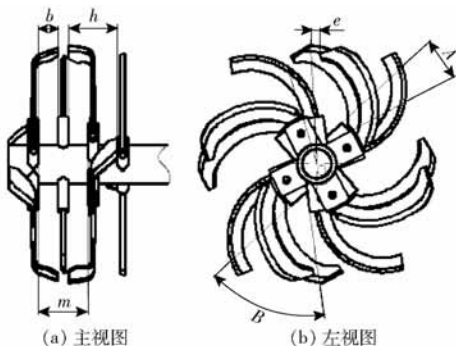


图5 刀片排列示意图

Fig. 5 Schematics of blades arrangement

刀刀座内侧间距 b 取值 39 mm , 相邻两把二次切刀刀座内侧间距 h 取值 100 mm 。可安装刀座的刀轴长度为 1100 mm , 则

$$100(x-1) + 22x \leq 1100 \quad (8)$$

式中 x ——每条螺旋线上轴向刀座数量, 把

由式(8)可得 $x \leq 9.8$, 取整数得 $x = 9$ 。

如图5b所示, 由于同一条螺旋线上左、右旋向旋耕刀交替入土, 所以在圆周方向上正切刃相向排列的组数为

$$z = \frac{y}{2} \quad (9)$$

式中 z ——同一切割小区内圆周方向上正切刃相向排列刀片组数

y ——同一切割小区内圆周方向上旋耕刀数量, 把

为保证刀辊受力均衡且作业平稳, z 取值需为偶数, 即 y 为 $4, 8, 12, \dots$ 。但是, 当 $y \geq 8$ 时, 刀辊尺寸过大, 且功耗急剧增加, 因此取 $y = 4$, 则同一切割小区内二次切刀数量为 2 。

为了使正切刃相向排列的相邻两把旋耕刀在刀辊旋转作用下形成类似圆柱体状, 正切刃相向安装的相邻两把旋耕刀正切刃间隙 e (图5) 不能太大; 同时为了保证未切断秸秆能顺利从空隙中滑出, e 需大于茎秆最大直径。本次设计取 $e = 15 \text{ mm}$ 。由于 A 值较小, 可近似得到

$$e = \frac{A}{180} \pi R_1 - p \quad (10)$$

式中 A ——相邻两把旋耕刀相位角, ($^\circ$)

p ——旋耕刀刀尖处刀宽近似值, 实际测量为 50 mm

R_1 ——旋耕刀最大旋转半径, mm

将各值代入式(10)求得 $A \approx 15^\circ$ 。

图6所示为切土垡片示意图。图中, A' 为与刀

片 3 在同一切土小区且正切刀方向相同的刀片刀尖入土点, B' 为刀片 1 刀尖入土点, C' 为刀片 3 刀尖入土点, K 为切土堡片宽度, P 为刀片 3 所受切向力。切削土壤时, 刀片 3 所受切削阻力为

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (11)$$

式中 F ——刀片 3 切削阻力, N

F_1 ——刀柄切削阻力, N

F_2 ——刀翼切削阻力, N

F_3 ——堡片撕裂土壤时的阻力, N

F_4 ——刀片与土壤间的摩擦阻力, N

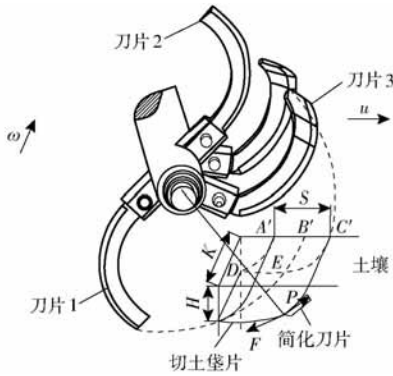


图 6 切土堡片示意图

Fig. 6 Schematic of cutting soil slice

无二次切刀时, 堡片撕裂土壤面积为 $S_{A'C'D}$, 二次切刀作用后, 堡片撕裂土壤面积为 $S_{B'C'E}$, 即二次切刀减小刀片 3 切削阻力主要体现在 $S_{A'B'ED}$ 面积的大小上。其面积越大, 撕裂土壤阻力越小; 其面积越小, 撕裂土壤阻力越大。公式表示为

$$\sigma = \frac{S_{A'B'ED}}{S_{A'C'D}} \times 100\% \quad (12)$$

式中 σ ——二次切刀减阻程度, %

图 7 为刀片运动轨迹示意图, 其运动方程分别为

$$\begin{cases} x_1 = ut + R\cos(\omega t) \\ y_1 = R\sin(\omega t) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} x_2 = u\left(t + \frac{T}{2}\right) + R\cos\left(\omega\left(t + \frac{T}{2}\right)\right) \\ y_2 = R\sin\left(\omega\left(t + \frac{T}{2}\right)\right) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} x_3 = u\left(t + \frac{270 - A - B}{360}T\right) + R_1\cos\left(\omega\left(t + \frac{270 - A - B}{360}T\right)\right) \\ y_3 = R_1\sin\left(\omega\left(t + \frac{270 - A - B}{360}T\right)\right) \end{cases} \quad (15)$$

式中 T ——刀辊旋转一周时间, s

B ——二次切刀与下一刻入土旋耕刀之间的相位角, ($^\circ$)

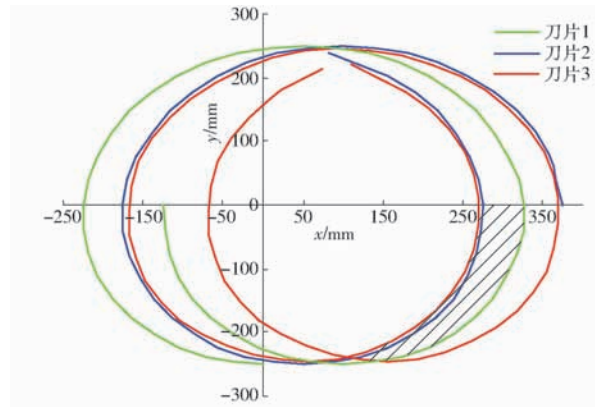


图 7 刀片运动轨迹示意图

Fig. 7 Schematic of blade movement track

示为二次切刀减阻程度。 B 越大, 减阻程度越大, 但不利于秸秆的二次切割; B 越小, 减阻程度越小, 且易夹土。前期预试验得出, 当 $B = 50^\circ$ 时秸秆粉碎效果较好, 且不易夹土, 因此取 $B = 50^\circ$ 。此时, 二次切刀减阻程度为 $\sigma \approx 58.6\%$ 。

由以上设计可得刀辊中刀片排列展开图, 如图 8 所示。由图 8 可得

$$\tan\gamma = \frac{\pi D \frac{15(x' - 1)}{360}}{122(x' - 1)} \quad (16)$$

式中 γ ——螺旋升角, ($^\circ$)

D ——刀轴直径, 取 80 mm

x' ——刀辊一条螺旋线上旋耕刀数量, 把

$$H_0 = \frac{\pi D}{\tan\gamma} \quad (17)$$

式中 H_0 ——旋耕刀排列螺旋线导程, mm

将各值代入解得: $\gamma \approx 5^\circ$, $H_0 \approx 2871$ mm。

2.3 作业参数选取

2.3.1 切土节距

切土节距对碎土率和秸秆粉碎率有重要影响, 其由整机运动参数和刀辊结构参数决定, 满足

$$S = \frac{60u}{n_0 Z} \quad (18)$$

式中 S ——切土节距, mm

n_0 ——刀辊转速, r/min

Z ——同一切土小区内正切刀方向相同刀片数量, 把

根据长江中下游土壤特点, 为满足碎土质量^[29], S 取值范围为 40 ~ 60 mm。将各值代入式(18), 结合 GB/T 5668—2008《旋耕机》可得 n_0 取值范围为 250 ~ 350 r/min。

2.3.2 作业耕深

如图 3 所示, 旋耕刀刃口上任一点 M 沿 X 轴方向运动方程为

$$x_0 = ut + R'\cos(\omega t) \quad (19)$$

图 7 中阴影部分面积占堡片横截面积比例可表

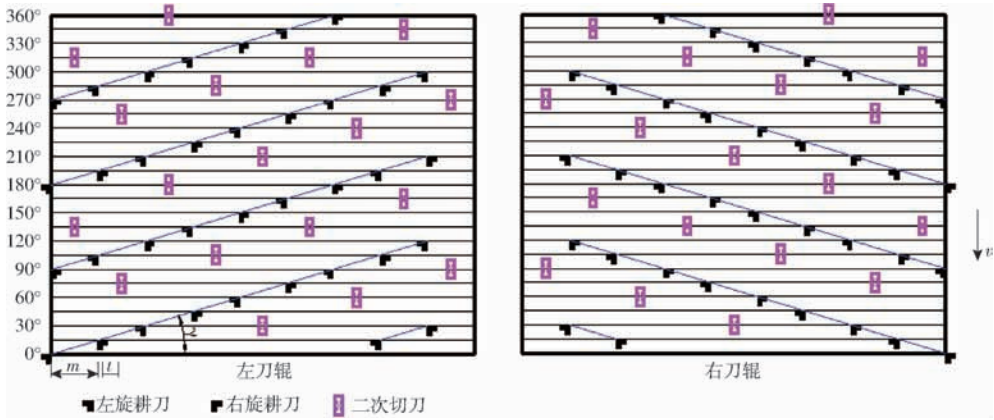


图8 刀片在刀辊上排列展开图

Fig.8 Blades arranged on knife roller

式中 x_0 ——点 M 沿 X 轴方向位移, mm

R' ——点 M 旋转半径, mm

则 M 点沿 X 轴方向速度为

$$v_x = u - R'\omega \sin(\omega t) \quad (20)$$

式中 v_x ——点 M 沿 X 轴方向速度, m/s

当 $v_x < 0$ 时, 刀片才能起到碎茬作用。联立式(5)和式(20)可得

$$H < R' \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (21)$$

将各值代入可得 $H < 196$ mm。

2.3.3 沟底凸起高度

旋耕作业后耕层底部有凸起存在, 该凸起部分是机具作业时未耕到的土壤, 其高度对播种和插秧均有影响, 各参数间相互关系应满足

$$R_1 \lambda \left[\frac{\pi(Z+2)}{2Z} - \arcsin \frac{R_1 - h}{R_1} \right] = \sqrt{2R_1 h - h^2} \quad (22)$$

式中 h ——沟底凸起高度, mm

根据农业技术要求^[28], 沟底凸起高度不超过耕深的20%, 即 $h \leq 0.2H$ 。将各值代入式(22)可得 $\lambda \geq 3.9$, 因此2.1节求得的 λ 取5~7, 满足该要求。

3 田间试验与结果分析

3.1 试验条件

试验于2018年5月在华中农业大学现代科技试验基地进行, 试验地为小麦茬地, 土壤类型为壤土。0~10 cm 土壤干基含水率为20.8%, 10 cm 深处土壤坚实度为2 208.0 kPa; 10~20 cm 土壤干基含水率25.0%, 20 cm 深处土壤坚实度4 081.9 kPa。收获后小麦秸秆平均高度为312 mm, 秸秆覆盖量为408 g/m²。刀辊实物如图9所示, 试验设备包括东方红 LX954 型轮式拖拉机、专用功率测试装置(黑龙江省农业机械工程科学研究院研制)、秒表、米尺、钢尺、水平尺和电子天平等。



图9 刀辊实物图

Fig.9 Physical photo of knife roller

3.2 试验方法

依据课题组前期研究^[20-21], 本试验取耕深、作业速度和刀辊转速为主要影响因素。根据小麦播种、油菜和水稻直播深度要求^[25,30-31], 结合2.3节对作业参数范围的分析, 取耕深范围为10~18 cm; 拖拉机作业挡位选用慢I、慢II和慢III, 作业速度范围0.5~1.1 m/s; 取刀辊转速范围250~320 r/min。试验采用 Design-Expert 软件中的 Box-Behnken 方案进行三因素三水平响应面试验, 其因素编码如表3所示。

表3 试验因素编码

Tab.3 Test factors codes

编码	因素		
	耕深 H /cm	作业速度 u / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	刀辊转速 n_0 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
-1	10	0.5	250
0	14	0.8	285
1	18	1.1	320

3.3 试验指标及测试方法

根据 GB/T 5668—2008 《旋耕机》要求, 结合保护性耕作技术, 选取试验指标为秸秆掩埋率、秸秆粉碎率、碎土率和功耗。由于上述标准中没有关于秸秆粉碎率的测量方法, 因此其测量方法按照 GB/T 24675.6—2009 《保护性耕作机械秸秆粉碎还田机》要求进行测量。试验区总长为30 m, 取中间20 m 为稳定测量区。同一工况重复3次, 结果取平均值。

3.3.1 秸秆掩埋率

在每个行程测量区中随机选取一点，测量 1 m × 1 m 面积内所有未被掩埋的秸秆质量，秸秆掩埋率计算公式为

$$Y_1 = \frac{M_q - M_h}{M_q} \times 100\% \quad (23)$$

式中 Y_1 ——秸秆掩埋率，%

M_q ——耕前单位面积秸秆质量，g/m²

M_h ——耕后单位面积未掩埋秸秆质量，g/m²

3.3.2 秸秆粉碎率

在每个行程测量区等间距选取 3 个点，分别测量每个点 1 m × 1 m 面积内全耕层所有秸秆质量和长度大于 10 mm 秸秆质量，秸秆粉碎率计算公式为

$$Y_2 = \frac{M_s - M_k}{M_s} \times 100\% \quad (24)$$

式中 Y_2 ——秸秆粉碎率，%

M_s ——1 m × 1 m 面积内全耕层所有秸秆质量，g

M_k ——1 m × 1 m 面积内全耕层长度大于 10 mm 的秸秆质量，g

计算每个取样点秸秆粉碎率，取平均值为该行程秸秆粉碎率。

3.3.3 碎土率

在每个行程测量区中随机选取一点，分别测量 0.5 m × 0.5 m 面积内全耕层所有土块质量和直径大于 4 cm 土块质量，碎土率计算公式为

$$Y_3 = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\% \quad (25)$$

式中 Y_3 ——碎土率，%

M_0 ——0.5 m × 0.5 m 面积内全耕层所有土块质量，g

M_1 ——0.5 m × 0.5 m 面积内全耕层直径大于 4 cm 土块质量，g

3.3.4 功耗

采用 ZigBee 无线传输技术，应用扭矩输出轴转速一体传感器、无线动态数据采集器和黑龙江省农业机械工程科学研究院研制的专用功率测试装置进行功耗测量，测量结果实时显示在专用软件面板上，并以 .csv 格式保存于终端计算机中。

3.4 结果与分析

根据 Box - Behnken 方案共进行 13 组试验，试验结果如表 4 所示。表中，A、B、C 分别为耕深、作业速度、刀辊转速因素编码值。

对表 4 试验结果进行处理，得秸秆掩埋率、秸秆粉碎率、碎土率、功耗的方差分析结果分别如表 5、6 所示。由表 5 可以得出，对于秸秆掩埋率，A²、A 和

表 4 试验方案与结果

Tab.4 Test scheme and results

试验序号	A	B	C	秸秆	秸秆	碎土率 Y ₃ /%	功耗 Y ₄ /kW
				掩埋率 Y ₁ /%	粉碎率 Y ₂ /%		
1	1	-1	0	93.8	83.4	76.9	34.5
2	1	0	-1	93.4	82.7	79.1	34.0
3	0	-1	1	96.1	94.2	83.6	33.1
4	-1	1	0	89.4	82.4	75.4	33.4
5	-1	0	-1	92.4	82.6	72.6	31.3
6	0	1	1	94.3	93.3	80.0	35.4
7	1	1	0	91.0	80.3	76.0	33.9
8	0	1	-1	93.6	81.2	79.3	31.8
9	-1	0	1	90.3	85.5	87.2	34.2
10	0	0	0	95.9	91.9	78.3	32.6
11	1	0	1	95.2	92.6	80.9	38.5
12	0	-1	-1	94.3	87.8	79.8	30.7
13	-1	-1	0	90.9	85.0	83.3	30.9

表 5 秸秆掩埋率和秸秆粉碎率方差分析结果

Tab.5 Variance analysis result of rate of straw burial and rate of straw crushing

方差来源	秸秆掩埋率			秸秆粉碎率		
	平方和	均方和	F	平方和	均方和	F
A	13.52	13.52	24.88	1.53	1.53	0.24
B	5.78	5.78	10.64	21.78	21.78	3.38
C	0.60	0.60	1.11	122.46	122.46	19.02
AB	0.42	0.42	0.78	0.06	0.062	<0.01
AC	3.80	3.80	7.00	12.25	12.25	1.90
BC	0.30	0.30	0.56	8.12	8.12	1.26
A ²	23.22	23.22	42.74	87.86	87.86	13.65
B ²	4.72	4.72	8.69	19.56	19.56	3.04
C ²	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	<0.01
残差	1.63	0.54		19.32	6.44	
总和	56.22			299.24		

表 6 碎土率和功耗方差分析结果

Tab.6 Variance analysis result of rate of soil pulverization and power

方差来源	碎土率			功耗		
	平方和	均方和	F	平方和	均方和	F
A	3.92	3.92	0.55	15.40	15.40	11.22
B	20.80	20.80	2.91	3.51	3.51	2.56
C	54.60	54.60	7.64	22.45	22.45	16.35
AB	12.25	12.25	1.71			
AC	40.96	40.96	5.73			
BC	2.40	2.40	0.34			
A ²						
B ²						
C ²						
残差	42.88	7.15		12.35	1.37	
总和	177.82			53.71		

B 影响显著;对于秸秆粉碎率, C 和 A^2 影响显著。各因素对秸秆掩埋率和秸秆粉碎率的影响显著性由大到小分别为耕深、作业速度、刀辊转速和刀辊转速、作业速度、耕深。由表 6 分析结果可知,对于碎土率, C 影响显著;对于功耗, A 和 C 影响极显著。各因素对碎土率和功耗的影响显著性由大到小分别为刀辊转速、作业速度、耕深和刀辊转速、耕深、作业速度。

表 5 和表 6 分析结果显示,各因素交互作用对秸秆掩埋率和秸秆粉碎率的影响较碎土率和功耗大,因此对秸秆掩埋率和秸秆粉碎率进行响应面分析,分别如图 10 和图 11 所示。由图 10a 可知,秸秆

掩埋率随着耕深和作业速度的增大均呈先增大后减小的趋势,在耕深为 14.7 cm、作业速度为 0.71 m/s 时达到最大值;由图 10b 和图 10c 可知,秸秆掩埋率随刀辊转速的增加呈增大趋势;由于刀辊转速对功耗影响极显著且随着刀辊转速的增加功耗呈增大趋势,因此,在满足秸秆掩埋率的前提下应尽量降低刀辊转速。由图 11a 可以得出,随着耕深和作业速度的增加,秸秆粉碎率均呈先增大后减小的趋势,在耕深为 14.2 cm、作业速度为 0.74 m/s 时达到最大值;由图 11b 和图 11c 可以得出,秸秆粉碎率随刀辊转速增加呈增大趋势。

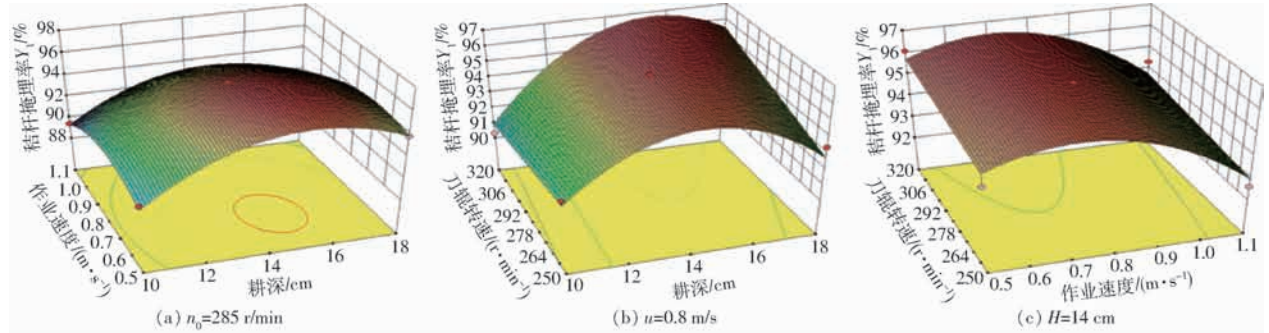


图 10 因素对秸秆掩埋率的影响

Fig. 10 Influence of factors on rate of straw burial

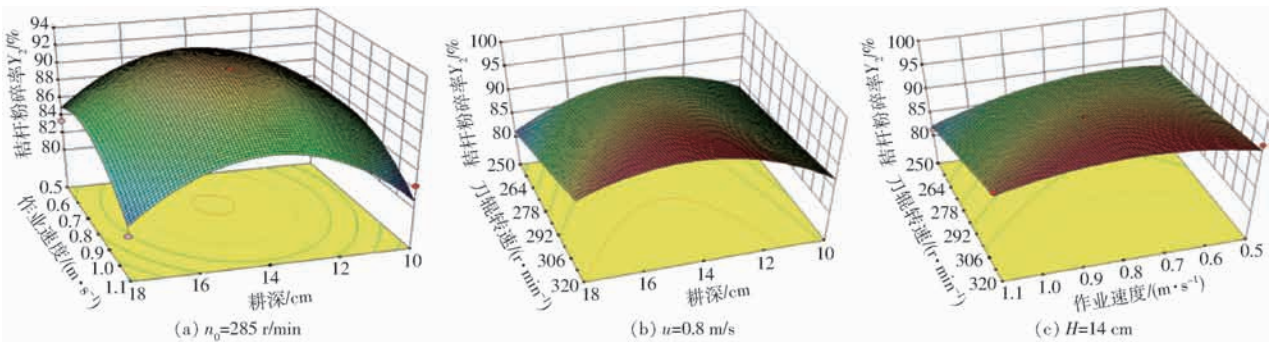


图 11 因素对秸秆粉碎率的影响

Fig. 11 Influence of factors on rate of straw crushing

由表 4 试验结果可以得出,碎土率均随刀辊转速的增加呈增大趋势,随耕深和作业速度的增加呈减小趋势,因素间无交互作用。功耗随耕深、作业速度和刀辊转速的增加均呈增大趋势,因素间无交互作用。因此,在满足作业质量的前提下应尽量选择较小刀辊转速。

应用软件中的 Optimization 功能,以降低功耗为首要目的,其次为秸秆掩埋率,最后分别为秸秆粉碎率和碎土率,进行优化分析,得最优参数组合为:耕深 12.7 cm,作业速度 0.7 m/s,刀辊转速 273 r/min。此时的预测效果为:功耗 30.4 kW,秸秆掩埋率 94.4%,秸秆粉碎率 89.2%,碎土率 80.3%。

4 试验

4.1 验证试验

应用响应面法分析得到的最优参数组合进行田间

验证试验,如图 12 所示。试验重复 3 次,取平均值,结果为:功耗 31.9 kW,秸秆掩埋率 93.1%,秸秆粉碎率 87.5%,碎土率 78.3%。与软件预测值误差分别为 4.7%、1.4%、1.9% 和 2.6%,软件预测误差较小。



图 12 田间试验

Fig. 12 Field test

4.2 对比试验

课题组前期研制的水旱两用秸秆还田耕整机作

业效果较传统秸秆还田耕整机作业效果好^[20],但旱耕作业功耗较大,因此将这两种秸秆还田耕整机进行对比试验,在保证作业质量满足要求的基础上降低功耗。在两种秸秆还田耕整机最优参数组合^[20-21]下分别进行试验,每组重复3次,取平均值,结果如表7所示。由表7可得,水旱两用秸秆还田耕整机秸秆掩埋率与功耗较六头螺旋秸秆还田耕整机高2.3%和8.8%,但秸秆粉碎率和碎土率分别较

后者低3.0%和6.1%,分析其原因主要是:水旱两用秸秆还田耕整机中使用的是螺旋横刀,其主要作用是压草和抛土,因此秸秆掩埋效果较六头螺旋秸秆还田耕整机好,但同时也增大了作业阻力,尤其在旱地作业时,功耗增加明显^[22-23];六头螺旋秸秆还田耕整机取消了螺旋横刀,增添了等滑切角二次切刀的使用,所以秸秆粉碎率和碎土率较水旱两用秸秆还田耕整机高,同时也降低了功耗。

表7 对比试验结果

Tab.7 Comparison test results

类型	功耗/kW	秸秆掩埋率/%	秸秆粉碎率/%	碎土率/%	有无缠绕
水旱两用秸秆还田耕整机	34.7	95.2	84.9	73.5	无
六头螺旋秸秆还田耕整机	31.9	93.1	87.5	78.3	无

5 结论

(1)基于茎秆力学特性和滑切原理,设计了等滑切角二次切刀,取消了螺旋横刀的使用,设计了六头螺旋秸秆还田耕整机,田间试验结果表明作业质量均满足国家标准要求。

(2)通过三因素三水平响应面试验结果分析,得出各因素对功耗、秸秆掩埋率、秸秆粉碎率和碎土率的影响显著性由大到小分别为:刀辊转速、耕深、作业速度;耕深、作业速度、刀辊转速;刀辊转

速、作业速度、耕深;刀辊转速、作业速度、耕深。并得到最优参数组合为耕深12.7 cm,作业速度0.7 m/s,刀辊转速273 r/min。验证试验结果表明,功耗、秸秆掩埋率、秸秆粉碎率和碎土率的实际测量值和预测值误差分别为4.7%、1.4%、1.9%和2.6%。

(3)与课题组前期研制的水旱两用秸秆还田耕整机田间对比试验得出,六头螺旋秸秆还田耕整机秸秆掩埋率和功耗分别低2.3%和8.8%,秸秆粉碎率和碎土率分别提高3.0%和6.1%。

参 考 文 献

- [1] PEIGNE J, VIAN J F, PAYET V, et al. Soil fertility 10 years of conservation tillage in organic farming[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 175: 194-204.
- [2] PURETA V L, PEREIRA E I P, WITTEWER R, et al. Improvement of soil structure through organic crop management conservation tillage and grass-clover ley[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 180: 1-9.
- [3] 林静,马铁,李宝筏. 1JHL-2型秸秆深埋还田机设计[J]. 农业工程学报,2017, 33(20): 32-40.
LIN Jing, MA Tie, LI Baofa. Design and test of 1JHL-2 type straw deep burying and returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 32-40. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 章志强,何进,李洪文,等. 可调节式秸秆粉碎抛撒还田机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017, 48(9): 76-87.
ZHANG Zhiqiang, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on straw chopper cum spreader with adjustable spreading device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 76-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170910&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.010. (in Chinese)
- [6] LEE K S, PARK S H, PARK W Y, et al. Strip tillage characteristics of rotary blades for use in a dryland direct rice seeder [J]. Soil & Tillage Research, 2003, 71(1): 25-32.
- [7] HAO G, MATHANKER S, MOMIN M A, et al. Effects of three cutting blade designs on energy consumption during mowing-conditioning of *Miscanthus Giganteus*[J]. Biomass and Bioenergy, 2018, 109: 166-171.
- [8] 王庆杰,牛琪,葛士林,等. 保护性耕作双翼对称旋切式浅松刀设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016, 47(增刊): 103-108.
WANG Qingjie, NIU Qi, GE Shilin, et al. Design and experiment of double-vane symmetrical rotary blade for surface tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 103-108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s016&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.016. (in Chinese)
- [9] 贾洪雷,黄东岩,刘晓亮,等. 耕作刀片在刀辊上的多头螺旋线对称排列法[J]. 农业工程学报,2011, 27(4): 111-116.
JIA Honglei, HUANG Dongyan, LIU Xiaoliang, et al. Symmetrical multi-spiral arrangement of tillage blades on rotor[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 111-116. (in Chinese)
- [10] MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLES J M A. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrows using three design of rotary blade[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 329-340.
- [11] AMER N N, AHMAD D, AKHIR M D, et al. Effects of rotary mower blade cutting angles on the pulverization of sweet potato

- vine[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2014, 2: 95 - 101.
- [12] 郭俊,张庆怡, MUHAMMAD S M, 等. 仿鼯鼠足趾排列的旋耕-秸秆粉碎锯齿刀片的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 43 - 50.
- GUO Jun, ZHANG Qingyi, MUHAMMAD S M, et al. Design and experiment of bionic mole's toe arrangement serrated blade for soil-rototilling and straw-shattering[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 43 - 50. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 尤泳,贺长彬,王德成,等. 土壤耕作部件极窄刀齿与土壤作用关系研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 50 - 58.
- YOU Yong, HE Changbin, WANG Decheng, et al. Interaction relationship between soil and very narrow tine during penetration process[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 50 - 58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170606&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.006. (in Chinese)
- [15] 王金武,尹大庆,韩永俊,等. 水稻秸秆整株还田机的设计与试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 54 - 56.
- WANG Jinwu, YIN Daqing, HAN Yongjun, et al. Design and experiment of whole rice straw returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10): 54 - 56. (in Chinese)
- [16] 王庆杰,刘正道,何进,等. 砍切式玉米秸秆还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 10 - 17.
- WANG Qingjie, LIU Zhengdao, HE Jin, et al. Design and experiment of chopping-type maize straw returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2): 10 - 17. (in Chinese)
- [17] 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/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 87 - 96.
- ZHENG Zhiqi, HE Jin, WANG Qingjie, et al. Design and experiment on straw pick-chopping and ditch-burying integrated machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 87 - 96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170711&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.011. (in Chinese)
- [18] 张喜瑞,甘声豹,郑侃,等. 滚割喂入式卧轴甩刀香蕉假茎粉碎还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 33 - 41.
- ZHANG Xirui, GAN Shengbao, ZHENG Kan, et al. Design and experiment on cut roll feeding type horizontal shaft flail machine for banana pseudostem crushing and returning[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 33 - 41. (in Chinese)
- [19] 周勇,余水生,夏俊芳. 水田高茬秸秆还田耕整机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 46 - 49, 77.
- ZHOU Yong, YU Shuisheng, XIA Junfang. Design and experiment of cultivator for high straw returning in paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 46 - 49, 77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120809&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.009. (in Chinese)
- [20] 张秀梅,张居敏,夏俊芳,等. 水旱两用秸秆还田耕整机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 10 - 16.
- ZHANG Xiumei, ZHANG Jumin, XIA Junfang, et al. Design and experiment on critical component of cultivator for straw returning in paddy field and dry land[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 10 - 16. (in Chinese)
- [21] 张秀梅,夏俊芳,张居敏,等. 水旱两用秸秆还田组合刀辊作业性能试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 9 - 15.
- ZHANG Xiumei, XIA Junfang, ZHANG Jumin, et al. Working performance experiment of combination blade roller for straw returning in paddy field and dry land[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 9 - 15. (in Chinese)
- [22] 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 sliding-cutting and anti-twinning returning device for banana straw[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 26 - 34. (in Chinese)
- [23] 倪长安,苗全生,刘玉,等. 玉米根茬破碎还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 68 - 71.
- NI Chang'an, MIAO Quansheng, LIU Yu, et al. Design and experiment of a new maize field rootstalk chopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 68 - 71. (in Chinese)
- [24] 李绍俭,杨亚生,谢仕君. 旋耕刀侧切刀刃口曲线的设计[J]. 四川工业学院学报, 1984(2): 17 - 22.
- [25] 朱惠斌,李洪文,何进,等. 稻茬地双轴驱动防堵式小麦免耕播种机[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 39 - 44.
- ZHU Huibin, LI Hongwen, HE Jin, et al. No-till wheat seeder with two-axel drive anti-blocking in rice stubble field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 39 - 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130608&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.008. (in Chinese)
- [26] 秦宽,丁为民,方志超,等. 稻麦联合收获开沟埋草一体机播种系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 54 - 62.
- QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Design and experiment of seeding system for harvest ditch and stalk-disposing machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 54 - 62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170506&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.006. (in Chinese)
- [27] 常晓慧,孔德刚,井上光弘,等. 秸秆还田方式对春播期土壤温度的影响[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(8): 117 - 120.
- CHANG Xiaohui, KONG Degang, INOUE Mitsuhiro, et al. Effect of different straw returning methods on soil temperature in spring sowing period[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(8): 117 - 120. (in Chinese)
- [28] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 1988.
- [29] 李守仁,林金天. 驱动型土壤耕作机械的理论 with 计算[M]. 北京:机械工业出版社, 1997.
- [30] 郑智旗,何进,李洪文,等. 动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 108 - 115.
- ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 108 - 115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s017&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.017. (in Chinese)
- [31] 张银平,杜瑞成,刁培松,等. 正反转组合式水稻宽苗带灭茬播种机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 7 - 13.
- ZHANG Yinping, DU Ruicheng, DIAO Peisong, et al. Design and experiment of wide band seeding rice seeder with reversed stubble cleaning and anti-blocking[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 7 - 13. (in Chinese)