

赵博, 汪小昆, 杨四军, 等. 水稻灭茬机扶茬机构设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(4): 100-104.

水稻灭茬机扶茬机构设计与试验

赵 博¹, 汪小昆^{1,2}, 杨四军³, Morice O. ODHIAMBO¹

(1 南京农业大学 工学院, 江苏 南京 210031; 2 江苏省智能化农业装备重点实验室, 江苏 南京 210031;
3 江苏省农业科学院 农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

摘要:【目的】解决水稻灭茬机作业时, 驱动轮容易将高留茬压倒, 引起轮辙处倒茬多, 导致水稻秸秆粉碎效果不理想的问题。【方法】研发了一种具有扶禾功能的水稻灭茬机, 利用固接于扶茬轮轴上的“L”型扶指, 采用扶茬轮轴和粉碎轮轴双侧带轮分流传动方式, 实现前置扶茬系统与后置粉碎系统配合作业, 使水稻秸秆倒伏的留茬被扶起后立即喂入粉碎室。采用正交设计试验验证灭茬机的田间性能。【结果】水稻灭茬机的前进速度、扶辊转速和扶指宽度均对水稻秸秆粉碎率有显著影响。田间试验的结果表明, 机具工作参数的最佳组合为前进速度 5.38 km·h⁻¹、扶辊转速 160 r·min⁻¹ 和扶指宽度 50 mm, 该组合的水稻秸秆粉碎效果最好, 粉碎率达到 92.52%。【结论】该扶茬机结构简单, 对水稻秸秆的扶茬粉碎效果好, 在实际生产中能够提升高留茬稻秆的粉碎效率。

关键词: 水稻秸秆; 灭茬机; 结构设计; 倒伏; 粉碎
中图分类号: S224 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-411X(2018)04-0100-05

Design and experiment of lifting mechanism of rice stubble cleaner

ZHAO Bo¹, WANG Xiaochan^{1,2}, YANG Sijun³, Morice O. ODHIAMBO¹

(1 College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2 Jiangsu Province Engineering Laboratory for Modern Facilities Agricultural Technology and Equipment, Nanjing 210031, China; 3 Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: 【Objective】To solve the problem that when rice stubble cleaner operates, its driving wheels easily roll down high remaining stubbles, causing many lodged stubbles on the wheel track and poor crushing effect. 【Method】A rice stubble cleaner with lifting function was developed in this paper. This machine adopted L-shaped rake finger of stalk lifter fixed on the stubble-lifting shaft, and a shunting transmission mode of stubble-lifting shaft and crushing shaft on both sides, so that the front stubble-lifting system and the rear crushing system cooperated with each other to enable lodged remaining stubbles to be lifted and immediately put into the crushing chamber. The field performance of this stubble cleaner was tested based on an orthogonal design. 【Result】The forward speed, rotational speed of roller and width of lifting finger of rice stubble cleaner had significant impact on stubble crushing rate. The optimum combination of working parameters of this equipment was that the forward speed was 5.38 km·h⁻¹, the rotational speed of roller was 160 r·min⁻¹ and the width of lifting finger was 8 cm. The crushing effect of this combination was the best and crushing rate reached 92.52%. 【Conclusion】This lifting mechanism is simple and its lifting and crushing effects are good. This stubble cleaner can improve crushing efficiency of high remaining rice stubbles in actual production.

Key words: rice straw; stubble cleaner; structural design; lodging; smash

水稻秸秆直接还田不仅可将秸秆就地处理, 提高利用效率, 还有利于改善土壤结构, 补充土壤养分, 进而提高下一茬作物的产量, 是我国一些省区重要的秸秆处理途径^[1-5]。目前, 高留茬切碎匀铺旋耕还田已成为江苏省稻麦轮作区秸秆还田的主流推广技术, 通过使用灭茬机将 30~40 cm 的田间留茬切碎并均匀撒布, 随后用旋耕机将秸秆翻埋进土壤中^[6-8]。此方案具有全喂入联合收割机作业功耗与磨损程度低、收获质量与秸秆还田率高、秸秆腐熟速度快等突出的优点^[9-14]。但由于稻秆柔韧性强, 留茬较高时, 容易被收割机驱动轮与灭茬机驱动轮二次压倒至前进的方向, 甚至嵌入泥土。此时, 灭茬机无法粉碎严重倒伏的水稻秸秆, 导致水稻秸秆的粉碎效果不理想, 并严重影响下一茬作物的播种^[15-17]。本文研制了一种带有新型扶茬机构的卧式水稻灭茬机, 通过大田试验验证该机具的性能并确定最优的工作参数组合, 以期稻麦轮作区水稻秸秆还田过程中的倒茬残留问题提供一种解决方案。

1 灭茬机机构设计

1.1 灭茬机整体结构及工作原理

针对现有的卧式灭茬机进行改进设计, 将扶茬机构前置于粉碎室。整体结构如图 1 所示, 主要包括机壳、悬挂机构、传动机构、粉碎机构、扶茬机构、镇压机构等部分。粉碎机构选用“Y”型甩刀与固定在机壳内的定刀配合切碎的工作方式, 刀片排列密度为 26 片·m⁻¹。

机具由配套的拖拉机动力输出轴输出动力: 一方面通过皮带将动力传递至动刀刀辊使其高速反向回转; 另一方面经链传动与带传动二次减速将动

力传递至扶辊。机具作业时, 扶辊回转平面最低点紧贴地面工作, 利用自身正转将扶指切入倒茬与地面间的空隙, 并自前向后扶起倒茬, 进入机壳附近, 通过动刀旋转产生的气流喂入粉碎系统, 秸秆在高速旋转的动刀与固定在机壳内的定刀配合下不断被切碎, 直至被切割到机架后部并均匀抛洒在田间。

1.2 扶茬机构及传动设计

1.2.1 扶茬机构关键参数 图 2 为扶茬机构工作原理简图。扶指运动至 P 点后切入秸秆顶部与地面的间隙, 并随机具前进与扶辊回转扶起秸秆, 最后再次于 B 点脱离秸秆。经预试验中测得, 灭茬机旋转所产生的风力场可有效将倒伏角大于 25° 的秸秆送至喂入口, 因而扶辊只需将倒茬扶起至一定角度后即可脱离秸秆, 从而达到降低功耗、减小辊轮损耗的目的。

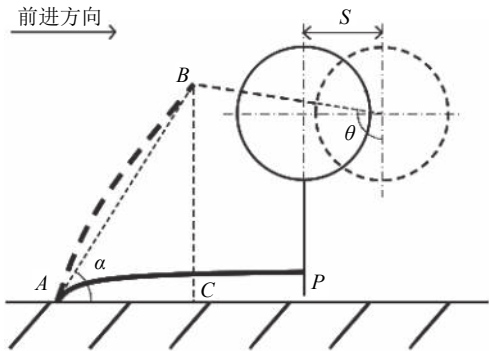


图 2 扶茬机构的工作原理图
Fig. 2 Working principle diagram of lifting system

设扶茬机构工作过程中, 秸秆形状保持为直线, 在三角形 ABC 中计算得到秸秆被扶起的角度(α) 满足公式 (1):

$$\alpha = \arctan \frac{R_f(1 - \cos \theta)}{L + S - R_f \sin \theta}, \tag{1}$$

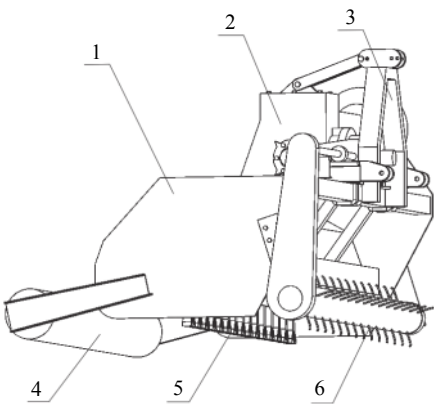
将 $S = V_m t$ 和 $\theta = \omega_f t$ 代入公式 (1), 得公式 (2):

$$\alpha = \arctan \frac{R_f(1 - \cos \omega_f t)}{L + V_m t - R_f \sin \omega_f t}, \tag{2}$$

式中, R_f 为扶指回转半径, mm; L 为秸秆长度, mm; V_m 为机具前进速度, km·h⁻¹, ω_f 为扶辊角速度, rad·s⁻¹; t 为时间, s。

由公式 (2) 可知, 时间一定时, 扶指回转半径越大, 秸秆长度与机具前进速度越小, 秸秆被扶起的角度越大。

1.2.2 扶指形状与扶辊回转半径 初期所设计的扶辊类似于拨禾轮的形状, 通过验证, 这种设计的



1: 机壳, 2: 传动机构, 3: 悬挂机构, 4: 镇压机构, 5: 粉碎机构, 6: 扶茬机构

图 1 灭茬机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of stubble cleaner
<http://xuebao.scau.edu.cn>

扶辊缠草严重,无法正常工作。故将扶指设计为“L”型结构,排列方式选用对称排布,扶指设计为4只×14只,扶指间距约为143 mm,保证秸秆有足够的脱离空间。扶辊整体结构如图3所示扶辊的旋转方向与驱动轮相同,扶指顶部运动速度(V)满足:

$$\begin{cases} V_x = V_m - R_f \omega_f \cos \omega_f t, \\ V_y = -R_f \omega_f \sin \omega_f t. \end{cases} \quad (3)$$

为使扶辊正常工作,要求其绝对运动轨迹为一摆线;同时,为避免扶禾轮缠草,其轴截面周长应大

于田间留茬长度。即

$$\begin{cases} n_f > \frac{30V_m}{\pi R_f}, \\ 2\pi r \geq L, \end{cases} \quad (4)$$

式中, r 为扶辊轴半径,mm; n_f 为扶辊转速, $r \cdot \min^{-1}$ 。

本机具 V_m 为 $3 \sim 8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、田间 L 约为 $300 \sim 350 \text{ mm}$,经综合考量,最终确定扶辊轴半径(r)为 70 mm 、扶指长度(h)为 100 mm ,即扶指最大回转半径(R_f)为 170 mm 。

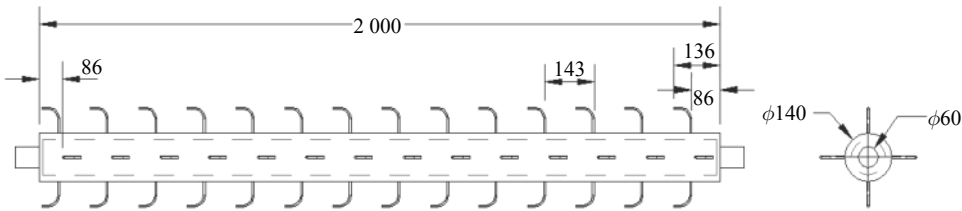


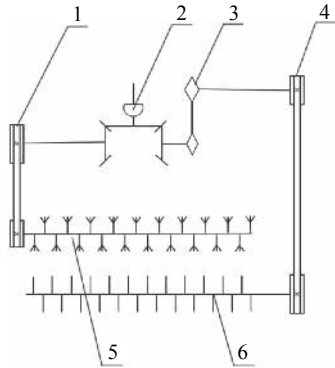
图 3 扶辊示意图 (单位: mm)
Fig. 3 Schematic diagram of lifting roller(unit: mm)

1.2.3 传动系统构成 本机具有拆装便利、制作工艺简单、整机质量轻等优点^[18]。含有刀辊和扶辊2个工作机,由于工作机运动形式简单、扶辊转速与转矩较低,采用分流传动方式完全能够满足需求。由于灭茬机采用中间传动时,刀辊中部齿轮箱将严重影响灭茬效率,故本机具采用双侧边传动。图4为本机传动系统示意图。

2 田间试验

2.1 试验条件

试验于2017年11月5日在江苏省泗洪县现代农业科技示范基地进行,田间试验状况如图5所示。试验地地势平坦,秸秆产量 $1.13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$,谷草比约为0.76,秸秆含水率(w)26.32%,秸秆平均长度317 mm。经由久保田-688全喂入履带收割机完成收割作业,配套动力为福格森-1204拖拉机,作业幅



1: 左侧皮带轮, 2: 万向节, 3: 过桥链轮, 4: 右侧皮带轮, 5: 粉碎刀辊, 6: 扶辊; 中央为变速箱一级传动, 左侧边为灭茬刀辊传动系统, 右侧边为扶辊传动系统

图 4 传动系统示意图
Fig. 4 Schematic diagram of transmission system

宽为2000 mm,履带宽400 mm,田间倒茬面积占比为40%。试验中由拖拉机前后轮再次压倒秸秆后倒



a: 田间试验
b: 扶茬粉碎效果

图 5 灭茬机田间性能试验示意图
Fig. 5 Field performance experiment of stubble cleaner

茬占比约为 56.5%, 其中, 收割机轮辙处 18.5%、双机具轮辙处 21.5% 和灭茬机轮辙处 16.5%。

2.2 试验方法

为控制试验变量, 令拖拉机右侧前驱动轮沿田间收割机轮辙行进, 机具前进速度的控制通过变更拖拉机不同档位组合方式实现, 并由其内部动力输出轴显示控制仪表调控各组扶辊转速, 再通过更换自行研制的 3 种扶辊类别得到试验所需的 不同扶指形状。卧式稻麦灭茬机工作后的根茬高度约为 50~110 mm, 本试验取根茬长度≥110 mm 的为不合格稻秆, 采用粉碎率 (η) 作为扶茬效果的验证指标, 计算公式如下:

$$\eta = \left(\frac{1 - W_1}{W_2} \right) \times 100\%, \tag{5}$$

式中, W_1 为粉碎后单位面积内留茬大于 110 mm 的茎秆数量, W_2 为总的茎秆数量。随机选取 1 m² 的样本区域, 于试验前人工计数得出 W_2 , 并在机具完成作业后计数不合格稻秆总数 W_1 , 重复 3 次, 取平均值作为各组试验的试验结果。

2.3 试验因素

采用三因素三水平正交试验 (表 1)。1) 机具前进速度 (V_m): 拖拉机灭茬工作时, 最大速度一般取 8 km·h⁻¹, 过快的速度将会降低粉碎合格率, 并增大拖拉机的输出功率^[19]。取试验机具前进的 3 个试验水平为低速龟二挡 (3.64 km·h⁻¹)、低速龟三档 (5.38 km·h⁻¹)、高速龟一档 (7.32 km·h⁻¹)。

表 1 正交试验的因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal design

水平	机具前进速度(V_m)/ (km·h ⁻¹)	扶辊转速(n_f)/ (r·min ⁻¹)	扶指宽度(H)/ mm
1	3.64	130	0
2	5.38	160	30
3	7.32	190	50

2) 扶辊转速 (n_f): 由式 (2) 可知, 扶辊转速是影响扶禾效果的重要参数, 当扶指在水平位置前与倒茬脱离 (即扶辊转角 $\theta < 90^\circ$) 时, 扶辊转速越快, 扶禾效果越好。但过快的转速会使倒茬受到冲击变形, 且加剧扶辊损耗。

3) 扶指宽度 (H): 扶指宽度即为轴向上扶指弯折处与顶点的距离, 显然扶指宽度越高, 理论上扶茬效果越好, 但扶指宽度过大将使扶指所受力矩增大, 降低工作寿命, 并使扶辊易于缠草。设置 H 为 0 (直型扶指)、30 与 50 mm 3 个水平, 3 类扶指形状如图 6 所示。

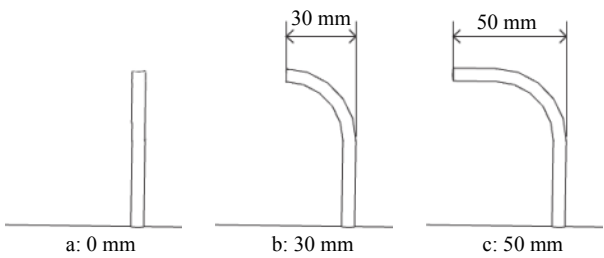


图 6 不同扶指宽度 (0、30 和 50 mm) 扶指形状示意图
Fig. 6 Schematic diagrams of lifting fingers with various width(0, 30 and 50 mm)

3 结果与分析

以粉碎率作为验证指标的三因素三水平正交试验结果如表 2 所示。为获得所设计扶茬机构对粉碎率的提升效果, 同时在机具未安装扶辊的条件下进行了对比试验, 得到无扶辊时灭茬机的最高粉碎率为 64.95%。试验过程中未发生缠草以及扶指断折。由表 2 可以看出, 影响粉碎率的因素排列为: 扶指宽度 (C) > 机具前进速度 (A) > 扶辊转速 (B)。最佳组合为 A₂B₂C₃, 秸秆粉碎率达到了 92.52%, 比无扶辊作业提高了 27.57%。研究结果表明, 本机具最优的组合为机具前进速度 5.38 km·h⁻¹、扶辊转速 160 r·min⁻¹、扶指宽度 50 mm, 此时秸秆切碎长度 (≤99 mm) 合格率为 91.04%, 能够满足设计要求。

正交试验的方差分析结果如表 3 所示。由表 3 可以看出, 机具前进速度与扶辊转速对秸秆粉碎率

表 2 正交试验结果和极差分析¹⁾

Table 2 The results and range analysis of orthogonal experiment

试验号	A	B	C	粉碎率/%
1	1	1	1	69.91
2	1	2	2	89.87
3	1	3	3	90.34
4	2	1	2	82.50
5	2	2	3	92.82
6	2	3	1	71.89
7	3	1	3	82.23
8	3	2	1	67.75
9	3	3	2	79.87
K_1 /%	83.37	78.21	69.85	
K_2 /%	82.40	83.48	84.08	
K_3 /%	76.62	80.70	88.46	
R /%	6.76	5.27	18.61	

1) A、B、C 分别为机具前进速度、扶辊转速、扶指宽度 3 个因素; K_1 、 K_2 、 K_3 为对应水平下粉碎率的平均值, R 为极差

有显著影响 ($P<0.05$), 扶指宽度对粉碎率的影响极为显著 ($P<0.01$)。在试验范围内, 机具前进速度增大, 扶辊工作时间变短, 所扶起倒茬角度减小。扶辊转速过慢, 被扶倒茬达不到所需角度; 扶辊转速过快, 倒茬因冲击产生弯折变形, 降低了扶茬效果。扶指宽度的增加可直接增大被扶起倒茬的比例。

表 3 正交试验的方差分析

Table 3 Variance analysis of orthogonal experiment				
因素	偏差平方和	自由度	平均偏差平方和	$F^{(1)}$
V_m	80.08	2	40.04	41.1*
n_f	41.65	2	20.82	21.3*
H	568.16	2	284.08	291.7**
误差	1.95	2	0.97	

1)“*”、“**”分别表示因素对试验结果的影响达0.05、0.01的显著水平

4 结论

针对水稻秸秆粉碎还田中的倒茬残留问题, 研制了带有新型扶禾机构的甩刀型水稻灭茬机, 研究了该机具的总体结构与工作参数, 确定了关键部件的设计方法, 证明了本机具的有效性。通过正交试验对本机具的工作参数进行研究, 以粉碎率(η)为指标, 分析了机具前进速度(V_m)、扶辊转速(n_f)、扶指宽度(H)对扶禾效果的影响。结果发现, 影响粉碎率的主次因素为扶指宽度>机具前进速度>扶辊转速, 机具前进速度与扶辊转速对粉碎率影响显著, 扶指宽度对粉碎率的影响极显著。当机具前进速度 $5.38\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、扶辊转速 $160\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、扶指宽度 50 mm 时, 粉碎率最高, 达到了 92.52% , 粉碎长度合格率为 91.04% 。试验结果达到设计目的, 验证了扶禾机构对于提高倒伏秸秆粉碎效果的可行性, 为后续扶禾机构的改进设计提供了理论支持。

实际工作中, 影响扶茬机构可靠性的因素较为复杂, 本试验所在农业科技示范基地农艺技术较为规范, 联合收割机收获前排水工作及时, 创造了良好的试验条件。若遇连绵阴雨逆境工作, 驱动轮压倒秸秆时土质黏软, 将使地表平整度降低, 倒茬陷入泥地较深, 不利于扶茬作业, 只能期待后续旋耕作业埋覆未粉碎的秸秆^[20]。

参考文献:

[1] 张庆玲. 水稻秸秆还田现状与分析[J]. 农机化研究, 2006(8): 223.
[2] 顾克军, 张斯梅, 许博, 等. 江苏省水稻秸秆资源量及其可收集量估算[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(1):

32-36.
[3] 叶文培, 谢小立, 王凯荣, 等. 不同时期秸秆还田对水稻生长发育及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(1): 65-70.
[4] ZHANG J, HANG X N, LAMINE S M, et al. Interactive effects of straw incorporation and tillage on crop yield and greenhouse gas emissions in double rice cropping system[J]. Agr Ecosyst Environ, 2017, 250: 37-43.
[5] 王金武, 王奇, 唐汉, 等. 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 112-117.
[6] 常志州, 陈新华, 杨四军, 等. 稻麦秸秆直接还田技术发展现状及展望[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(4): 909-914.
[7] 杜永林. 江苏秸秆全量还田少免耕稻作技术及其应用探讨[J]. 耕作与栽培, 2005(5): 47-50.
[8] 顾克军, 张传辉, 顾东祥, 等. 水稻秸秆养分垂直分布特征与不同留茬高度下还田养分估算[J]. 中国土壤与肥料, 2017(3): 99-104.
[9] 张秀梅. 高茬秸秆还田旋耕机工作机理与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
[10] 张洪程, 龚金龙. 中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探讨[J]. 中国农业科学, 2014, 47(7): 1273-1289.
[11] HU N J, WANG B J, GU Z H, et al. Effects of different straw returning modes on greenhouse gas emissions and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. Agr Ecosyst Environ, 2016, 223: 115-122.
[12] 刘世平, 陈后庆, 陈文林, 等. 不同耕作方式与秸秆还田周年生产力的综合评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 82-85.
[13] 杨志臣, 吕贻忠, 张凤荣, 等. 秸秆还田和腐熟有机肥对水稻土壤肥效果对比分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 214-218.
[14] HIRAI Y, INOUE E, MORI K. Application of a quasi-static stalk bending analysis to the dynamic response of rice and wheat stalks gathered by a combine harvester reel[J]. Biosyst Eng, 2004, 88(3): 281-294.
[15] 顾克军, 杨四军, 张斯梅, 等. 不同生产条件下留茬高度对水稻秸秆可收集量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 831-835.
[16] 邱进, 吴明亮, 官春云, 等. 动定刀同轴水稻秸秆切碎还田装置结构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 11-19.
[17] 陈海涛, 张颖, 黄振华, 等. 含水率对水稻秸秆流体力学特性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(11): 90-94.
[18] 杜朝伟. 一种新型玉米秸秆粉碎还田机的研制与试验[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
[19] 贾洪雷, 姜鑫铭, 郭明卓, 等. V-L 型秸秆粉碎还田刀片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 28-33.
[20] 李亚伟, 肖跃成, 吴爱国, 等. 稻田麦草全量还田带水旋耕技术示范初报[J]. 中国稻米, 2007(4): 45-48.