

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.015

马铃薯杀秧机设计优化与试验

吕金庆 尚琴琴 杨颖 李紫辉 李季成 刘中原

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 马铃薯收获前的杀秧作业对提高马铃薯品质及收获效率有显著的促进作用, 现有机型存在打碎长度合格率差、带薯率高、土壤在护罩上粘着严重等问题, 为此, 设计一种新型马铃薯杀秧机。对其关键部件进行结构设计, 并分析了甩刀排列方式对杀秧性能的影响。以机具作业速度、甩刀刀辊转速、垄上刀距垄台高度为试验因素, 以打碎长度合格率、留茬高度、带薯率为试验指标进行田间试验。结果表明: 护罩开长孔结构减少了土壤的粘着; 机器作业速度为 4.5 ~ 6.0 km/h、甩刀刀辊转速为 1 500 ~ 1 600 r/min、垄上刀距垄台高度为 50 ~ 52 mm 时, 试验指标打碎长度合格率为 94.7% ~ 95.5%、留茬高度为 56.0 ~ 59.9 mm、带薯率为 0.15% ~ 0.23%, 杀秧机杀秧效果较好, 满足马铃薯杀秧机作业质量要求且机具作业稳定。

关键词: 马铃薯杀秧机; 优化; 田间试验

中图分类号: S222.29; S532 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0106-09

Design Optimization and Experiment on Potato Haulm Cutter

Lü Jinqing Shang Qinqin Yang Ying Li Zihui Li Jicheng Liu Zhongyuan

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In recent years, with rapid growth of potato planting area, potato has become the fourth largest food crop and the largest non-cereal food. Potato plays an important role in solving the problem of food security in developing countries. In view of potato massive planting situation, it is very important to solve the problem of the use of potato haulm before the harvest. At the present stage in China, the main way of dealing with potato seedling or burning is using chemicals which leads to the increased burden on the environment. It is a waste of resources with vine abandoned or burned, as the potato vine is rich of nutrients, and do not meet the requirements of the sustainable development of agriculture in China. Cutting treatment of potato haulm before the potato harvest can not only reduce the potato harvesting machine failure rate and power consumption, but also very much conform to the agronomic requirements. Potato machinery cut haulms can make potato tuber skin aging that can make it easier separate from vine. After cutting haulms, potato tuber can significantly reduce the mechanical damage because of harvest, transport and storage. So that cutting seedlings before the potato harvest has a great role in promoting to improve the quality of potato and the potato harvest efficiency. Currently available machines for potato haulm cutting effect is not very ideal, and there are some problems such as poor breaking length qualified rate, high rate of tuber and soil severe adhesion in the shield, and so on. In order to solve the problems above, this paper presented a potato haulm cutter. This article described the main structure and working principle of the machine. The experiment was carried out with the combination design of orthogonal and quadratic regression equation for the flail. The influence factors of field experiment included rotational

收稿日期: 2015-10-04 修回日期: 2016-01-27

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD06B03)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-10-P22)和黑龙江省重大科技攻关项目(GA15B401)

作者简介: 吕金庆(1970—),男,研究员,主要从事马铃薯新型技术及装备研究,E-mail: ljq66668888@163.com

speed of knife-cylinder, forward speed and distance between knife on ridge and ground. Evaluation indices included break length pass rate, stubble height and the potato carrying rate. The Design - Expert software was used to analyze and optimize the test results, and to obtain a better combination of factors. According with the comparison with the potato professional standard validation, the superiority of this haulm cutter was verified. Results indicated that: the performance of cutting haulm was improved because of the design of structure parameters of flail and the shield eccentric arc structure could reduce the soil adhesion. The field test showed that when rotational speed of knife-cylinder was 1 500 ~ 1 600 r/min, forward speed was 4.5 ~ 6.0 km/h and distance between knife on ridge and ground was 50 ~ 52 mm, break length pass rate was 94.7% ~ 95.5%, stubble height was 56.0 ~ 59.9 mm and the potato carrying rate was 0.15% ~ 0.23%. The research provided a solution of the potato haulm cutter to soil adhesion serious, low breaking length, qualified rate and high stubble height after cut the haulm. The study provided a solution during cutting the potato haulm and provided the reference for further research of potato haulm cutter.

Key words: potato haulm cutter; optimization; field experiment

引言

近几年中国马铃薯种植面积逐年增加,马铃薯已经成为重要的粮菜兼用作物,马铃薯收获前的机械化杀秧作业也越来越受到重视。杀秧作业能够促进薯皮老化,降低收获作业过程中升运链分离器对块茎造成的破皮损伤,促进收获质量的提升;同时,杀秧亦可降低收获机分离器的故障率,提高分离质量,减少收获损耗,促进收获效率的提高;此外,机械化杀秧作业还可避免因应用化学杀秧剂而对环境造成的污染^[1-4]。

国外马铃薯杀秧机研究起步较早,具有代表性的有格力莫KS系列马铃薯杀秧机^[5-6],国内已大量进口应用,但切碎长度和留茬高度等作业质量有待提高,在售后服务上也还存在价格昂贵、零配件供应不及时的弊端。国内马铃薯杀秧机的研究具有代表性的有:中机美诺1804型马铃薯杀秧机^[7],青岛农业大学周申等^[8]设计的小型马铃薯杀秧机等。目前,马铃薯杀秧机田间作业效果普遍存在打碎长度合格率差、带薯率高和土壤粘着护罩内侧壁严重等问题,打碎长度不合格将直接影响下一步的马铃薯收获作业,增加收获机的作业负荷;护罩粘土过多会增加杀秧机的整体质量,增加拖拉机能耗,同时影响甩刀的作业效果^[9-13]。基于以上分析,研究设计一种适应性强、作业质量高和性能优越的马铃薯杀秧机很有必要。

本文通过杀秧机关键部件的设计和甩刀排列方式的分析,获得合理的机具结构参数,并通过田间试验获得最佳的工作参数组合范围,以更好地满足杀秧作业要求。

1 整机

1.1 整机结构

整机结构如图1所示,该杀秧机以拖拉机或联合收获机为动力,采用三点悬挂方式;整机由悬挂架、机架总成、护罩、传动系统、刀辊系统、限深轮等组成。其中,刀辊系统由外径为160 mm的无缝钢管及短轴、立式甩刀、刀座等组成。甩刀以双螺旋对称排列方式安装在刀辊上,甩刀分为垄上刀、垄侧刀和垄沟刀,不同位置的甩刀长短不同,通过仿垄形作业,保证杀秧效果。

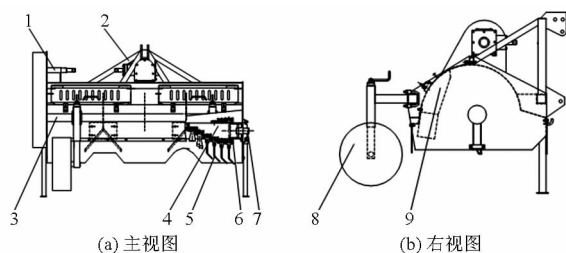


图1 马铃薯杀秧机结构简图

Fig.1 Structure diagram of potato haulm cutter

1. 传动系统 2. 悬挂架 3. 机架总成 4. 刀辊系统 5. 甩刀
6. 刀座 7. 短轴 8. 限深轮 9. 护罩

1.2 工作原理

杀秧机采用三点悬挂方式与拖拉机挂接,拖拉机提供牵引力及作业动力,动力经齿轮箱、带传动传递至刀辊,刀辊作高速转动。甩刀通过销轴与刀座铰接在刀辊上,机具作业时,高速旋转的甩刀将茎秧及杂草打断,打断后的茎秧、杂草被甩刀带入护罩壳内,并在甩刀、护罩及护罩壳内设置的定刀的共同作用下被进一步打击、砍切、揉搓成碎段,最后由茎秧抛出口抛撒到田间。

1.3 整机主要技术参数

马铃薯杀秧机结构设计应符合马铃薯杀秧的农艺技术要求。甩刀和隔套配合装配可以适应不同垄距的马铃薯杀秧作业,增加了机具的通用性。马铃薯杀秧机的主要技术参数如表1所示。

表1 杀秧机的主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of haulm cutter

参数	数值
配套动力/kW	>48.5
外形尺寸/(mm × mm × mm)	1 956 × 2 210 × 1 485
整机质量/kg	653
作业行数	2
适应垄距/mm	800 ~ 900
工作速度/(km · h ⁻¹)	4 ~ 7

2 关键部件结构设计

2.1 杀秧机护罩结构设计

杀秧机护罩作用为:安全防护;防止罩下被击打的茎秧、杂草及土壤杂物抛出及扬尘;配合甩刀对茎秧、杂草等进一步打碎。田间作业时杀秧机护罩内壁常会粘着土壤,且清理不便,造成整机质量增加,并影响杀秧机作业性能。为解决现有问题及进一步完善护罩在杀秧作业中所起作用,对护罩进行结构设计,如图2所示。

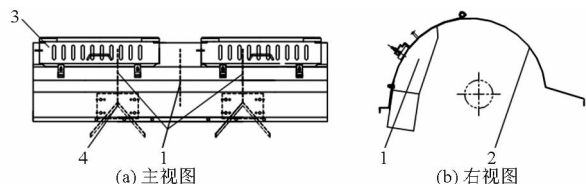


图2 护罩结构图

Fig.2 Structure diagram of protective guard

1. 定刀 2. 罩壳 3. 天窗板 4. 分叉板

杀秧机的护罩主要由罩壳、定刀、天窗板和分叉板组成。罩壳采用偏心圆弧形结构,从茎秧进口到出口甩刀与罩壳间的间隙逐渐增大^[14],依据文献^[15]罩壳与甩刀回转半径之间的空隙,前端为30~40 mm,后端为70~80 mm,进口间隙小利于茎秧的破碎,但过小易造成堵塞卡死现象发生;出口间隙大利于茎秧的抛出,但过大则造成整机尺寸增加,最终确定垄沟刀与罩壳间隙为35~80 mm。罩壳内侧对应垄上及垄沟位置设置定刀,与甩刀配合进一步打碎茎秧。分叉板设置在垄上定刀的下侧,对打碎的茎秧及杂草的抛撒起到导向作用,使茎秧杂草更均匀的向垄沟铺放。护罩上设置天窗板,杀秧机出现粘土或缠绕严重问题时可将其打开进行清理,降低机器故障率,提高作业效率。田间作业过程中,

天窗板区域粘土较严重,为降低土壤粘着率,在天窗板处开设长孔,为防止土壤堵塞长孔和打碎的茎秧无规律抛出,设计长孔宽度为20 mm,长孔的圆弧长度为150 mm,以间距为65 mm均布在天窗板上,以避免频繁打开天窗板影响工作效率。

2.2 甩刀结构设计

为了使杀秧机作业时达到仿垄形的效果,根据马铃薯种植的垄形特点,杀秧机上分别安装垄上刀、垄侧刀和垄沟刀。针对现有杀秧机存在的打碎长度合格率差、留茬高度高和带薯率高等问题,对3种类型的甩刀结构进行设计^[16-19],旨在提高杀秧质量。甩刀结构如图3所示。

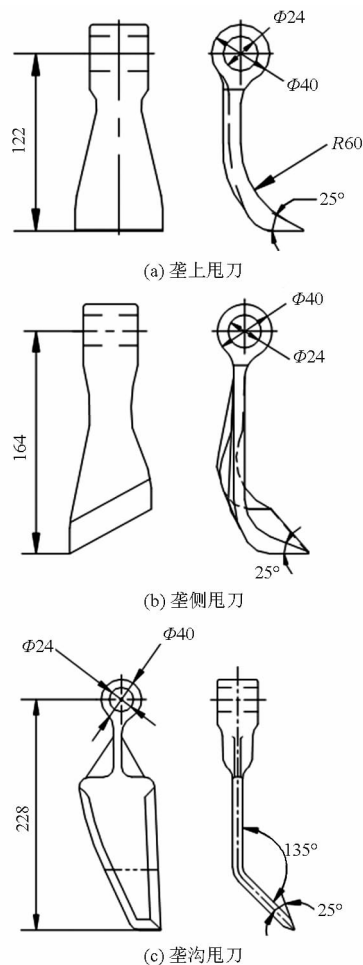


图3 甩刀结构图

Fig.3 Structure diagram of flail knife

如图3a、3b所示,甩刀铰接在直径为20 mm的销轴上,为保证甩刀绕销轴自由转动,甩刀安装孔直径设计为24 mm。甩刀采用仿垄形设计,根据我国东北地区马铃薯播种的垄高、垄宽、刀辊与地面的距离和对留茬高度的要求,设计垄上刀、垄侧刀长度分别为122 mm和164 mm。甩刀工作面采用圆弧结构,圆弧半径过小易粘土,影响甩刀杀秧性能,且易造成应力集中,影响甩刀强度;在甩刀长度一定的前

提下,圆弧半径过大时会降低甩刀的抛带秧性能,综合以上因素经过试验比较最终确定垄上刀、垄侧刀的圆弧半径 R 为 60 mm。随着刃磨角的增大,切割比功增大,而刃角过小时,又不耐磨。平板刀的刃角常取为 $21^\circ \sim 25^\circ$ [20],考虑到刀刃的强度,保证甩刀的砍切能力,甩刀刀刃角设定为 25° ,甩刀背部设计两道加强筋以增加甩刀强度,与现有甩刀相比,设计甩刀质心距刀刃较近,增加了甩刀质心与刀辊旋转中心的距离,减小了甩刀在砍切茎秧时产生的偏转角 [21-23],提高了杀秧效果;为了仿垄形,垄侧刀刀刃为斜刃,作业时对茎秧有滑切作用,降低切割阻力。

如图 3c 所示,垄沟刀采用弯刀设计,增加甩刀与茎秧的接触面积,利于对茎秧的聚敛。弯刀由前端部和侧切部构成,为保证甩刀砍切茎秧时甩刀根部不易缠草,在杀秧时甩刀侧切刀采用近似旋耕刀的正弦指数侧切刀曲线(忽略甩刀杀秧过程中产生的偏角)。正弦指数曲线方程为

$$\rho = \rho_0 \left[\frac{\sin \tau_0}{\sin(\tau_0 - K\theta)} \right]^{\frac{1}{k}} \quad (1)$$

式中 ρ ——曲线上任意点极径,mm

ρ_0 ——曲线起点极径,mm

τ_0 ——曲线起点的静态滑切角, ($^\circ$)

K ——曲线上静态滑切角递减量的比值

θ ——曲线上任意点的极角, ($^\circ$)

参照文献[15],根据刀辊回转半径及甩刀在最低点的位置,最终确定 $\rho_0 = 204$ mm, $\tau_0 = 50^\circ$ 。正切刀采用斜刃利于滑切茎秧,降低功耗,为了使甩刀对茎秧有聚敛作用,甩刀侧切部和前端部呈一定角度设计,由于角度过小甩刀易于缠草,角度过大会减小甩刀幅宽,降低甩刀对薯秧杂草的聚敛作用,经过试验比较最终确定甩刀侧切部与前端部呈 135° ,刀刃角为 25° 。根据我国东北地区马铃薯种植的垄沟深度、刀辊与地面的距离和对留茬高度的要求,采用仿垄形设计,确定垄沟刀的长度为 228 mm。

3 甩刀在刀辊上的排列方式

甩刀在刀辊上的排列方式直接影响马铃薯杀秧机的作业性能 [24-28],正确合理的排列方式可以提高杀秧质量,有效提高机器的稳定性,降低机器故障率。甩刀排列方式应满足:①在保证不漏切的情况下,增大甩刀在刀辊轴向上的安装距离,尽可能增加径向相邻甩刀间的角度,避免甩刀间的相互干扰和茎秧阻塞的现象发生,减少对甩刀的磨损。②相邻刀具在刀辊径向上的安装角度相等、轴向分布均匀,使刀辊在空载状态下受力均匀,刀辊所受的合力为零,降低刀辊在机具作业时产生的振动。甩刀排列

方式多样,结合不同排列方式的优缺点及杀秧机的作业特点,该杀秧机甩刀排列方式采用双螺旋对称排列,其在刀辊上的排列展开图如图 4 所示,其中 Y 轴的正向为杀秧机前进方向,以刀辊上的其中一条螺旋线为起点,沿着刀辊的轴向列出刀具排列图。图中 β 为螺旋角, ($^\circ$); γ 为升角, ($^\circ$)。

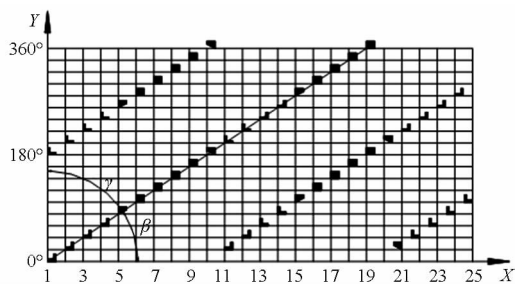


图 4 甩刀在刀辊上的排列展开图

Fig. 4 Developed view of arrangement of flail knife on rotor

由图 4 所示,相邻两刀的相位角相差 20° 。每个茎秧切削区域内有两把相同类型甩刀,保证杀秧过程中作业稳定且刀片磨损均匀一致,同一切削区域内的垄沟刀对称排列,使得刀辊受力均匀。此种排列方式不仅可以起到很好的仿垄形效果,而且可以避免刀轴旋转过程中的附加载荷和作业中的振动。

4 田间试验

4.1 试验条件

分别于 2014 年 10 月和 2015 年 9 月中旬在黑龙江省农业科学院试验基地(作业面积 5 hm^2)进行了田间杀秧试验,该杀秧试验于马铃薯收获前一周进行。试验地为旱地垄播,试验区垄长大于 200 m,垄距为 800 mm,垄高 250 mm,茎秧高度为 400 mm,含水率为 20%,土壤含水率为 22.7%,田间伴有少量杂草。马铃薯杀秧机配套动力为约翰迪尔 654 型拖拉机,功率为 48.5 kW,田间作业情况如图 5 所示。



图 5 样机田间试验

Fig. 5 Field experiment of prototype

4.2 试验方法与试验目的

根据文献[29]规定的试验方法进行马铃薯田间杀秧试验,考察各参数下杀秧机的工作性能,以刀辊转速、杀秧机前进速度、垄上刀距垄台高度为试验因素进行二次回归正交试验,分别测定杀秧机的秧秆打碎长度合格率、留茬高度和带薯率 3 个指标。

打碎长度合格率为打碎长度合格的秧秆质量与打碎秧秆总质量的比值,%;带薯率为杀秧作业携带出的马铃薯质量与区域内仍埋地下及杀秧携带出的所有薯块总质量的比值,%。

4.3 试验方案与结果分析

4.3.1 试验方案及结果

采用二次回归正交组合试验设计方法安排试验,以打碎长度合格率、留茬高度、带薯率为试验指标,设置各因素的水平范围为:马铃薯杀秧机前进速度 4.0~7.0 km/h、刀辊转速 1 200~1 600 r/min、垄上刀距垄台高度 40~120 mm。通过试验,对影响试验指标的 3 个因素进行显著性分析,根据实际需求对各参数组合进行优化,最终获得较合适的各因素组合。试验因素水平编码如表 2 所示,试验方案及试验结果如表 3 所示。

表 2 试验因素水平与编码

Tab. 2 Experimental factors and levels

编码	试验因素		
	刀辊转速 $x_1/(r \cdot \min^{-1})$	杀秧机前进速度 $x_2/(km \cdot h^{-1})$	垄上刀距垄台高度 x_3/mm
γ	1 600	7.0	120
1	1 548	6.6	110
0	1 400	5.5	80
-1	1 252	4.4	50
$-\gamma$	1 200	4.0	40
Δ_i	148	1.1	30

注:选取中心点的试验次数为 3 次,根据二次回归中交组合设计常用 γ 表,取得 $\gamma = 1.353$ 。

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Test plan and experimental data

序号	试验因素			打碎长度合格 率 $Y_1/\%$	留茬 高度 Y_2/mm	带薯率 $Y_3/\%$
	$x_1/(r \cdot \min^{-1})$	$x_2/(km \cdot h^{-1})$	x_3/mm			
1	1 548	6.6	110	92.9	115	0.11
2	1 548	6.6	50	94.7	58	0.21
3	1 548	4.4	110	93.5	117	0.08
4	1 548	4.4	50	94.2	63	0.22
5	1 252	6.6	110	92.3	120	0.20
6	1 252	6.6	50	92.9	72	0.52
7	1 252	4.4	110	89.4	122	0.16
8	1 252	4.4	50	92.3	75	0.42
9	1 600	5.5	80	95.1	85	0.29
10	1 200	5.5	80	92.4	97	0.51
11	1 400	7.0	80	93.5	90	0.37
12	1 400	4.0	80	92.5	91	0.29
13	1 400	5.5	120	93.7	126	0.26
14	1 400	5.5	40	95.0	48	0.50
15	1 400	5.5	80	94.2	88	0.41
16	1 400	5.5	80	93.8	86	0.37
17	1 400	5.5	80	94.2	86	0.41

4.3.2 结果分析

利用 Design - Expert 8.0.6 软件对试验结果进行二次回归分析,并进行多元回归拟合,得到打碎长度合格率 Y_1 、留茬高度 Y_2 和带薯率 Y_3 3 个试验指标的回归方程,并检验其显著性^[30-31]。

4.3.2.1 打碎长度合格率 Y_1 回归模型的建立与显著性检验

通过对试验数据的分析和拟合,打碎长度合格率 Y_1 方差分析如表 4 所示。由表 4 可知,对于打碎长度合格率 Y_1 ,因素及因素间的交互作用影响的主次顺序是 x_1 、 x_3 、 x_2^2 、 x_2 、 x_1x_2 、 x_1^2 、 x_2x_3 、 x_1x_3 、 x_3^2 ,刀辊转速 x_1 、垄上刀与垄台高度 x_3 和杀秧机前进速度的二次项 x_2^2 对打碎长度合格率 Y_1 的影响极显著 ($P < 0.01$);杀秧机前进速度 x_2 对打碎长度合格率 Y_1 的影响显著 ($0.01 < P < 0.05$);刀辊转速和杀秧机前进速度的交互项 x_1x_2 、刀辊转速的二次项 x_1^2 对打碎长度合格率 Y_1 的影响较显著 ($0.05 < P < 0.1$);其中杀秧机前进速度和垄上刀距垄台高度的交互项 x_2x_3 、刀辊转速和垄上刀距垄台高度的交互项 x_1x_3 和垄上刀距垄台高度的二次项 x_3^2 对打碎长度合格率 Y_1 的影响不显著 ($P > 0.1$)。将不显著的交互作用项的回归平方和及自由度并入残差项,而后再进行方差分析,结果如表 4 所示。得到各因素对打碎长度合格率 Y_1 影响的回归方程

$$Y_1 = 3.59125 + 0.077441x_1 + 11.74454x_2 - 0.022507x_3 - 2.74643 \times 10^{-3}x_1x_2 - 1.97653 \times 10^{-5}x_1^2 - 0.68472x_2^2 \quad (2)$$

对上述回归方程进行失拟性检验,如表 4 所示,其中 $P = 0.1439$,不显著 ($P > 0.1$),证明不存在其他影响指标的主要因素,试验因素与试验指标存在显著的二次关系。

4.3.2.2 留茬高度 Y_2 回归方程的建立与显著性检验

通过对试验数据的分析和多元回归拟合,试验指标留茬高度 Y_2 方差分析如表 5 所示。由表 5 可知,对于留茬高度 Y_2 ,因素影响的主次顺序是 x_3 、 x_1 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_1x_3 、 x_2 、 x_3^2 、 x_2x_3 、 x_1x_2 ,垄上刀距垄台高度 x_3 、刀辊转速 x_1 对留茬高度 Y_2 的影响极显著 ($P < 0.01$);刀辊转速的二次项 x_1^2 、杀秧机前进速度的二次项 x_2^2 、刀辊转速和垄上刀距垄台高度的交互项 x_1x_3 对留茬高度 Y_2 的影响显著 ($0.01 < P < 0.05$);其中杀秧机前进速度 x_2 、垄上刀距垄台高度的二次项 x_3^2 、杀秧机前进速度和垄上刀距垄台高度的交互项 x_2x_3 、刀辊转速和杀秧机前进速度的交互项 x_1x_2 对留茬高度 Y_2 的影响不显著 ($P > 0.1$)。将不显著

表 4 打碎长度合格率 Y_1 方差分析

Tab. 4 Variance analysis of pass rate for break length

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	27.55/27.17	9/6	3.06/4.53	8.85/16.17	0.004 5*** / 0.000 1***
x_1	12.46/12.46	1/1	12.46/12.46	35.99/44.49	0.000 5*** / <0.000 1***
x_2	1.94/1.94	1/1	1.94/1.94	5.60/6.92	0.049 9** / 0.025 2**
x_3	5.16/5.16	1/1	5.16/5.16	14.92/18.43	0.006 2*** / 0.001 6***
x_1x_2	1.62/1.62	1/1	1.62/1.62	4.68/5.78	0.067 3* / 0.037 0**
x_1x_3	0.12	1	0.12	0.36	0.566 8
x_2x_3	0.18	1	0.18	0.52	0.494 2
x_1^2	1.25/1.25	1/1	1.25/1.25	3.61/4.46	0.099 1* / 0.060 8*
x_2^2	4.75/4.75	1/1	4.75/4.75	13.72/16.95	0.007 6*** / 0.002 1***
x_3^2	0.073	1	0.073	0.21	0.660 7
残差	失拟差	5/8	0.35/0.28	8.69/6.31	0.106 5/0.143 9
	误差	2/2	0.46/0.34		
总和	29.98/29.98	16/16	0.053/0.053		

注：斜线后面为剔除不显著因素后打碎长度合格率 Y_1 方差分析结果；*** 表示极显著 ($P < 0.01$)；** 表示显著 ($0.01 < P < 0.05$)；* 表示较显著 ($0.05 < P < 0.1$)。下同。

表 5 留茬高度 Y_2 方差分析

Tab. 5 Variance analysis for stubble height

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	8 713.21/8 707.21	9/6	968.13/1 451.20	205.19/371.89	<0.000 1*** / <0.000 1***
x_1	233.99/233.99	1/1	233.99/233.99	49.59/59.96	0.000 2*** / <0.000 1***
x_2	15.29/15.29	1/1	15.29/15.29	3.24/3.92	0.114 9/0.075 9*
x_3	8 322.79/8 322.79	1/1	8 322.79/8 322.79	1 763.95/2 132.83	<0.000 1*** / <0.000 1***
x_1x_2	0.50	1	0.50	0.11	0.754 3
x_1x_3	32.00/32.00	1/1	32.00/32.00	6.78/8.20	0.035 2** / 0.016 9**
x_2x_3	2.00	1	2.00	0.42	0.535 8
x_1^2	56.64/56.64	1/1	56.64/56.64	12.01/14.52	0.010 5** / 0.003 4***
x_2^2	46.50/46.50	1/1	46.50/46.50	9.86/11.92	0.016 4** / 0.006 2***
x_3^2	3.49	1	3.49	0.74	0.418 0
残差	失拟差	5/8	6.07/4.54	4.55/3.41	0.189 8/0.246 6
	误差	2/2	1.33/1.33		
总和	8 746.24/8 746.24	16/16			

的交互作用项的回归平方和及自由度并入残差项，而后再进行方差分析，结果如表 5 所示。得到各因素对留茬高度 Y_2 影响的回归方程

$$Y_2 = 439.402 86 - 0.439 45x_1 - 24.606 20x_2 + 0.262 88x_3 + 4.577 38 \times 10^{-4}x_1x_3 + 1.330 45 \times 10^{-4}x_1^2 + 2.143 03x_2^2 \quad (3)$$

对上述回归方程进行失拟性检验，如表 5 所示，其中 $P = 0.246 6$ ，不显著 ($P > 0.1$)，证明不存在其他影响指标的主要因素，试验指标和试验因素存在显著的二次关系。

4.3.2.3 带薯率 Y_3 回归方程的建立与显著性检验

通过对试验数据的分析和多元回归拟合，试验指标带薯率 Y_3 方差分析如表 6 所示。由表 6 可知，对于带薯率 Y_3 ，因素影响的主次顺序是 x_3 、 x_1 、 x_2^2 、 x_3^2 、 x_1x_3 、 x_1^2 、 x_2 、 x_1x_2 、 x_2x_3 ，垄上刀距垄台高度 x_3 、刀

辊转速 x_1 、杀秧机前进速度的二次项 x_2^2 对带薯率 Y_3 的影响极显著 ($P < 0.01$)；垄上刀距垄台高度的二次项 x_3^2 对带薯率 Y_3 的影响显著 ($0.01 < P < 0.05$)；刀辊转速和垄上刀距垄台高度的交互项 x_1x_3 ，刀辊转速的二次项 x_1^2 对带薯率 Y_3 的影响较显著 ($0.05 < P < 0.1$)；其中杀秧机前进速度 x_2 、刀辊转速和杀秧机前进速度的交互项 x_1x_2 、杀秧机前进速度和垄上刀距垄台高度的交互项 x_2x_3 对带薯率 Y_3 的影响不显著 ($P > 0.1$)。将不显著的交互作用项的回归平方和及自由度并入残差项，而后再进行方差分析，结果如表 6 所示。得到各因素对带薯率 Y_3 影响的回归方程

$$Y_3 = -3.483 38 + 3.846 25 \times 10^{-3}x_1 + 0.725 56x_2 - 7.521 74 \times 10^{-3}x_3 + 9.726 93 \times 10^{-6}x_1x_3 - 1.854 15 \times 10^{-6}x_1^2 - 0.064 074x_2^2 - 5.885 37 \times 10^{-5}x_3^2 \quad (4)$$

表6 带薯率 Y_3 方差分析

Tab.6 Variance analysis for potato carrying rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.29/0.29	9/7	0.032/0.041	10.59/16.00	0.0026*** / 0.0002***
x_1	0.082/0.082	1/1	0.082/0.082	27.22/32.17	0.0012*** / 0.0003***
x_2	$6.170 \times 10^{-3} / 6.170 \times 10^{-3}$	1/1	$6.170 \times 10^{-3} / 6.170 \times 10^{-3}$	2.05/2.42	0.1954/0.1541
x_3	0.11/0.11	1/1	0.11/0.11	37.32/44.11	0.0005*** / <0.0001***
x_1x_2	1.800×10^{-3}	1	1.800×10^{-3}	0.60	0.4647
x_1x_3	0.014/0.014	1/1	0.014/0.014	4.80/5.67	0.0646* / 0.0411**
x_2x_3	5.000×10^{-5}	1	5.000×10^{-5}	0.017	0.9011
x_1^2	0.011/0.011	1/1	0.011/0.011	3.65/4.32	0.0976* / 0.0675*
x_2^2	0.042/0.042	1/1	0.042/0.042	13.80/16.32	0.0075*** / 0.0029**
x_3^2	0.018/0.018	1/1	0.018/0.018	5.89/6.96	0.0456** / 0.0270**
残差	失拟差	5/7	$4.002 \times 10^{-3} / 3.123 \times 10^{-3}$	7.50/5.86	0.1217/0.1536
	误差	2/2	$5.333 \times 10^{-4} / 5.333 \times 10^{-4}$		
总和	0.31/0.31	16/16			

对上述回归方程进行失拟性检验,如表6所示,其中 $P=0.1536$,不显著 ($P>0.1$),证明不存在其他影响指标的主要因素,试验指标和试验因素存在显著的二次关系。

4.3.3 响应曲面分析

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对数据处理,得出刀辊转速 x_1 、杀秧机前进速度 x_2 、垄上刀距垄台高度 x_3 之间显著和较显著交互作用对打碎长度合格率 Y_1 、留茬高度 Y_2 、带薯率 Y_3 3 个试验指标影响的响应曲面,如图6所示。

对于打碎长度合格率 Y_1 ,当上刀距垄台高度为 80 mm 时,杀秧机前进速度和刀辊转速的交互作用响应曲面如图 6a 所示。当杀秧机前进速度一定时,打碎长度合格率 Y_1 随着刀辊转速的增加而增加,最优的刀辊转速在 1437 ~ 1548 r/min 范围内;当刀辊转速一定时,打碎长度合格率 Y_1 随着杀秧机前进速度的增加先增大后减小,最优的杀秧机前进速度在 4.9 ~ 5.9 km/h 范围内。在杀秧机前进速度和刀辊转速的交互作用中,主要影响打碎长度合格率 Y_1 的因素是刀辊转速。

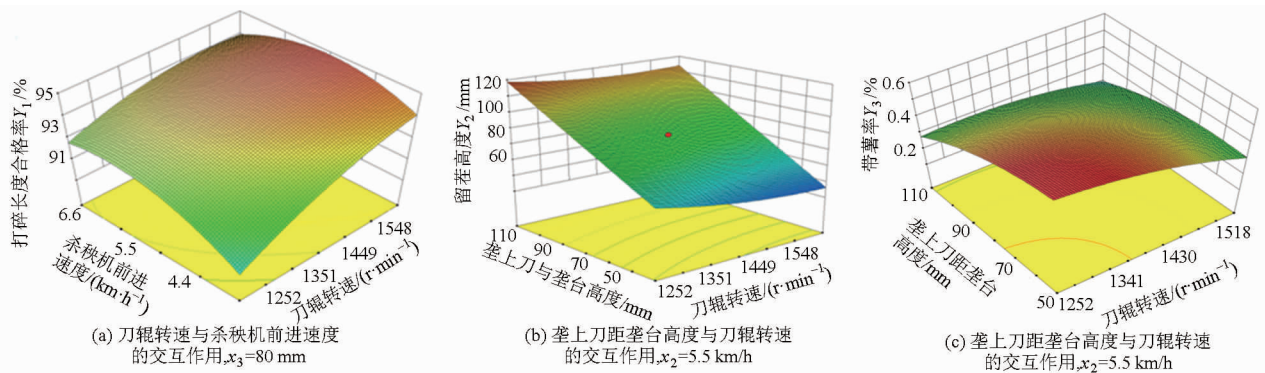


图6 杀秧机性能试验结果

Fig.6 Results of performance test of haulm cutter

对于试验指标留茬高度 Y_2 ,当杀秧机前进速度为 5.5 km/h 时,刀辊转速和垄上刀距垄台高度的交互作用如图 6b 所示。当垄上刀距垄台高度一定时,留茬高度 Y_2 随着刀辊转速的增加呈减小趋势,最优的刀辊转速在 1373 ~ 1548 r/min 范围内;当刀辊转速一定时,留茬高度 Y_2 随着垄上刀距垄台高度的增加而增加,最优的垄上刀距垄台高度在 50 ~ 60 mm 范围内。在垄上刀距垄台高度和刀辊转速的交互作用中,主要影响留茬高度 Y_2 的因素是垄上刀距垄台高度。

对于指标带薯率 Y_3 ,当杀秧机前进速度为

5.5 km/h 时,刀辊转速和垄上刀距垄台高度的交互作用如图 6c 所示。当垄上刀距垄台高度一定时,带薯率 Y_3 随着刀辊转速的增加而呈减小趋势,最优的刀辊转速在 1517 ~ 1548 r/min 范围内;当刀辊转速一定时,带薯率 Y_3 随着垄上刀距垄台高度的增加而减小,最优的垄上刀距垄台高度在 103 ~ 110 mm 范围内。在垄上刀距垄台高度和刀辊转速的交互作用中,主要影响带薯率 Y_3 的因素是垄上刀距垄台高度。

通过对图 6 中 3 个响应曲面的分析,利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化模块对 3 个回

归模型进行求解,根据杀秧机的实际工作条件、作业性能要求及上述相关模型分析结果,选择优化约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_3(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 1\ 300\ \text{r/min} \leq x_1 \leq 1\ 600\ \text{r/min} \\ 4.5\ \text{km/h} \leq x_2 \leq 6\ \text{km/h} \\ 50\ \text{mm} \leq x_3 \leq 110\ \text{mm} \end{cases} \end{cases}$$

对其参数进行求解,得到多种参数优化组合。考虑机具工作的稳定性,同时保证杀秧机的作业质量,从多个优化结果中选取最佳参数组合范围为:刀辊转速 1 500 ~ 1 600 r/min、杀秧机前进速度 4.5 ~ 6.0 km/h、垄上刀距垄台高度 50 ~ 52 mm,相对应的试验指标打碎长度合格率范围为 94.7% ~ 95.5%、留茬高度范围为 56.0 ~ 59.9 mm、带薯率为 0.15% ~ 0.23%。

4.4 验证试验

4.4.1 试验条件

试验地点为黑龙江省农业科学院试验基地(作业面积 2.5 hm²)。旱地垄播,试验区垄长大于 200 m,垄距为 800 mm,垄高 250 mm,垄播株距约为 250 mm,结薯深度为 150 ~ 200 mm,茎秧高度为 400 mm,土壤含水率为 22.7%,田间伴有少量杂草。马铃薯收获机配套动力为约翰迪尔 654 型拖拉机,功率为 48.5 kW。以文献[29]中的杀秧机质量指标为依据,将设计机具的相关田间杀秧作业质量指标与之相对照,从而验证机具的杀秧性能。

4.4.2 试验结果分析

经过设计和优化调节后的杀秧机性能指标与相关参照指标对比结果如表 7 所示。杀秧机作业参数选择为:刀辊转速 1 600 r/min、杀秧机前进速度 5 km/h、垄上刀距垄台高度 50 mm,相对应优化的试验指标打碎长度合格率为 95.4%、留茬高度为 57.1 mm、带薯率为 0.21%。将杀秧机作业参数调整为上述状态进行杀秧作业,其中测量结果为 3 次测量的平均值。

由表 7 可知,新设计机型的杀秧性能指标打碎长度合格率、留茬高度和带薯率均优于作为参照的马铃薯相关指标。其中带薯率较低,由于甩刀刀型设计合理,增加了刀片的转动惯量,可以更好地切断

表 7 测量结果与参照指标比较

Tab. 7 Measuring results compared with reference index

项目	打碎长度合格率/%	留茬高度/mm	带薯率/%
参照指标	≥80	≤150	≤0.8
本文结果	95.2	55	0.22

薯秧,从而降低了带薯率;打碎长度合格率较相关的参照指标高出 10 个百分点,主要原因在于茎秧被抛带进护罩、定刀、甩刀组成的工作腔内,被进一步打碎,提高了打碎长度合格率;留茬高度比相关参照指标最大值低 95 mm,主要原因在于甩刀刀角及重心偏向刀刀的结构设计使其在切割过程中有较小的偏转角,使砍切能力增强,加之合理的离地高度,有效降低了留茬高度。验证试验表明相关优化组合合理,按优化参数调节后的马铃薯杀秧机的杀秧性能满足马铃薯杀秧作业要求。

5 结论

(1)设计的马铃薯杀秧机能够适应马铃薯收获前的杀秧作业。护罩上开长孔的设计降低了土壤在其上的粘着率,降低了拖拉机能耗,甩刀的结构设计使得其转动惯量增大,进而减小了甩刀杀秧时的偏转角,提高了杀秧质量和效率。甩刀双螺旋对称的排列方式,减小了刀辊在旋转过程中产生的附加载荷,降低振动。

(2)对设计的马铃薯杀秧机进行了二次回归正交试验,建立打碎长度合格率、留茬高度和带薯率 3 个试验指标与试验因素间的回归模型,分析得出影响打碎长度合格率的因素主次顺序为刀辊转速、垄上刀距垄台高度、杀秧机前进速度;影响留茬高度的因素主次顺序为垄上刀距垄台高度、刀辊转速、杀秧机前进速度;影响带薯率的因素主次顺序为垄上刀距垄台高度、刀辊转速、杀秧机前进速度。

(3)利用 Design - Expert 8.0.6 的优化功能,根据杀秧机的实际工作条件和作业性能要求对试验因素添加约束,以打碎长度合格率、留茬高度和带薯率为评价指标,对其 3 个回归模型进行优化求解,得出当刀辊转速为 1 500 ~ 1 600 r/min、杀秧机前进速度为 4.5 ~ 6.0 km/h、垄上刀距垄台高度为 50 ~ 52 mm 时,相对应的试验指标打碎长度合格率为 94.7% ~ 95.5%、留茬高度为 56.0 ~ 59.9 mm、带薯率为 0.15% ~ 0.23%。通过验证试验表明,各项指标均优于参照指标,满足马铃薯杀秧机的杀秧作业要求。

参 考 文 献

- KEMPENAAR C, STRUIK P C. The canon of potato science: haulm killing[J]. Potato Research, 2008, 50(3): 341 - 345.
- 柳俊. 我国马铃薯产业技术研究现状及展望[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(5): 13 - 18.

- LIU Jun. Research status and prospects of potato industry in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(5): 13-18. (in Chinese)
- 3 杨帅, 冈凡祥, 高云飞, 等. 新世纪中国马铃薯产业发展现状及存在问题[J]. 中国马铃薯, 2014, 28(5): 311-316.
YANG Shuai, MIN Fanxiang, GAO Yunfei, et al. Status quo and challenges of China potato industry of the 21st century[J]. Chinese Potato Journal, 2014, 28(5): 311-316. (in Chinese)
- 4 李殿军, 乔雪静, 闫任沛, 等. 杀秧机及不同化学制剂对马铃薯杀秧效果比较试验[J]. 中国马铃薯, 2011, 25(6): 334-336.
LI Dianjun, QIAO Xuejing, YAN Renpei, et al. Comparing trials of potato haulm killing by haulm cutter and chemical agents[J]. Chinese Potato Journal, 2011, 25(6): 334-336. (in Chinese)
- 5 冯斌. 甩刀式马铃薯杀秧机设计与研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.
FENG Bin. Design and study on killing potato vine machine with flail[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 6 贾晶霞, 李洋, 杨德秋, 等. 国内外马铃薯杀秧机发展概况[J]. 农业机械, 2011(7): 78-79.
- 7 李洋, 贾晶霞, 杨德秋, 等. 1804型马铃薯杀秧机的研制[J]. 农业机械, 2010(增刊3): 74-75.
- 8 周申, 蒋金琳, 田艳清, 等. 小型马铃薯杀秧机的设计与田间试验[J]. 农机化研究, 2014, 36(11): 122-125.
ZHOU Shen, JIANG Jinlin, TIAN Yanqing, et al. Design and field trial of a small haulm toppler[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(11): 122-125. (in Chinese)
- 9 冯斌, 孙伟, 王蒂, 等. 甩刀式马铃薯杀秧机的设计与试验[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 269-274.
FENG Bin, SUN Wei, WANG Di, et al. Design and experiment on flail potato vine cutting machine[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(4): 269-274. (in Chinese)
- 10 王毅, 黄雪锋, 熊平原. 南方冬种马铃薯杀秧机的设计[J]. 农业科技与装备, 2015(1): 20-22.
WANG Yi, HUANG Xuefeng, XIONG Pingyuan. Design of killing potato stem machine for southern winter cultivation[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2015(1): 20-22. (in Chinese)
- 11 吕金庆, 毛俐, 王海龙, 等. 4JYQ-2型马铃薯茎叶切碎机的研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(7): 113-114, 117.
LÜ Jinqing, MAO Li, WANG Hailong, et al. Research on 4JYQ-2-type potato leaf shredder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(7): 113-114, 117. (in Chinese)
- 12 杜宏伟, 綦耀光, 杨然兵. 薯垄仿形马铃薯杀秧机的研制[J]. 农机化研究, 2013, 35(12): 98-100, 104.
DU Hongwei, QI Yaoguang, YANG Ranbing. Design of profiling potato stem chopping machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(12): 98-100, 104. (in Chinese)
- 13 赵辅群, 吴崇友, 黄铭森. 稻麦全喂入联合收割机茎秆切碎装置研究进展[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(6): 31-34.
ZHAO Fuqun, WU Chongyou, HUANG Mingsen. Research progress of straw chopper device of whole feeding combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(6): 31-34. (in Chinese)
- 14 毛罕平, 陈翠英. 秸秆还田机工作机理与参数分析[J]. 农业工程学报, 1995, 11(4): 62-66.
MAO Hanping, CHEN Cuiying. Working mechanism and parameters determination of field straw chopper[J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(4): 62-66. (in Chinese)
- 15 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 1版. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- 16 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.
JIA Honglei, JIANG Xinming, GUO Mingzhuo, et al. Design and experiment of V-L shaped smashed straw blade[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 28-33. (in Chinese)
- 17 SAIMBHI V S, WADHWA D S, GREWAL P S. Development of a rotary tiller blade using three-dimensional computer graphics[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(1): 47-58.
- 18 MATIN Md A, FIELKE John M, DESBIOLLES Jacky M A. Furrow parameters in rotary strip-tillage: effect of blade geometry and rotary speed[J]. Biosystems Engineering, 2014, 118: 7-15.
- 19 李永磊, 宋建农, 康小军, 等. 双辊秸秆还田旋耕机试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 45-49.
LI Yonglei, SONG Jiannong, KANG Xiaojun, et al. Experiment on twin-roller cultivator for straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 45-49. (in Chinese)
- 20 吴丽丽, 刘天舒, 吕黄珍, 等. 一种高效秸秆切碎器的设计研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(5): 133-135, 139.
WU Lili, LIU Tianshu, LÜ Huangzhen, et al. Research and design of an efficient straw chopper[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(5): 133-135, 139. (in Chinese)
- 21 张晋国, 高焕文. 免耕播种机新型防堵装置的研究[J]. 农业机械学报, 2000, 31(4): 33-35.
ZHANG Jinguo, GAO Huanwen. Study on the strip chopping anti-blocking mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(4): 33-35. (in Chinese)
- 22 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)

- 16 葛正浩. ADAMS 2007 虚拟样机技术[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- 17 赵希芳. ADAMS 中的柔性体分析研究[J]. 电子机械工程,2006(3):62-64.
ZHAO Xifang. A study on flexible body using ADAMS[J]. Electro-Mechanical Engineering,2006(3):62-64. (in Chinese)
- 18 栾锡富. ADAMS 柔性体建模方法的研究[J]. 佳木斯大学学报:自然科学版,2007,3(5):370-371.
LUAN Xifu. Research on modeling method of flexible bodies using ADAMS[J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition,2007,3(5):370-371. (in Chinese)
- 19 蒲明辉,吴江. 基于 ADAMS 的甘蔗柔性体模型建模研究[J]. 系统仿真学报,2009,7(4):1930-1932.
PU Minghui, WU Jiang. Study on flexible sugarcane modeling based on ADAMS software[J]. Journal of System Simulation, 2009,7(4):1930-1932. (in Chinese)
- 20 蒲明辉. 小型甘蔗收割机虚拟设计及仿真[D]. 南宁:广西大学,2005.
PU Minghui. The virtual design and simulation for small-scale type sugarcane harvester[D]. Nanning:Guangxi University, 2005. (in Chinese)
- 21 宋融融. 小型甘蔗收割机台架物流仿真及动态分析与设计[D]. 南宁:广西大学,2006.
SONG Rongrong. The kinematics simulation and dynamic analysis and design of the mini-type sugarcane harvester's uplift[D]. Nanning:Guangxi University, 2006. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 114 页)

- 23 刘宝,宗力,张东兴. 锤片式粉碎机空载运行中锤片的受力及运动状态[J]. 农业工程学报,2011,27(7):123-128.  
LIU Bao, ZONG Li, ZHANG Dongxing. Force and motion states of hammer mill at unloaded running[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 123-128. (in Chinese)
- 24 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 46-49, 77. (in Chinese)
- 25 高凤. 双螺旋变螺距旋耕起垄机的研究与设计[D]. 南昌:江西农业大学,2013.  
GAO Feng. Research and design of the double helix pitch rotary tilling ridger[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 26 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)
- 27 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)
- 28 徐红光,朱茂桃,耿松. 1GF-170 型灭茬旋耕机刀具排列方法设计[J]. 安徽农业科学,2011(34):21495-21496.  
XU Hongguang, ZHU Maotao, GENG Song. The arrangement design of 1GF-170 type stubble-breaking and rotary-tiller blade [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011(34): 21495-21496. (in Chinese)
- 29 谢洪昌,赵世宏,高勇. 评价马铃薯打秧机作业质量的指标及检测方法[J]. 现代化农业,2011(11):44-46.  
XIE Hongchang, ZHAO Shihong, GAO Yong. The evaluation index and detection method for working quality of potato haulm cutter[J]. Modernizing Agriculture, 2011(11): 44-46. (in Chinese)
- 30 袁志发,周静萍. 试验设计与数据分析[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- 31 何为,薛卫东,唐斌. 优化试验设计方法与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2012.