

大蒜联合收获机按压式切根装置设计与试验

侯加林^{1,2} 李超^{1,3} 娄伟^{1,2} 李天华^{1,2} 李玉华^{1,2} 周凯^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018;
3. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 针对大蒜联合收获作业过程中根系切净率低与损伤率高的问题,设计了一种按压式切根装置,阐述了其主要结构与工作机理。通过理论计算确定了夹持输送与切割机构作业参数,构建大蒜夹持运动方程和拨轮组动力、变形及切割力学模型。以链轮、拨轮和圆盘刀转速为试验因素,伤蒜率和切净率为试验指标,利用 Design-Expert 8.0.5 软件进行回归与响应面分析,构建三元二次回归模型,得到各因素对指标值的影响顺序。结果表明,当链轮、拨轮和圆盘刀转速为 107、52、197 r/min 时,装置性能最优,伤蒜率和切净率分别为 0.63% 和 97.07%。对比鳞茎顶端定位“浮动切根装置”的最优参数组合,结果表明,所提出的装置伤蒜率降低 2.15 个百分点,切净率提高 3.9 个百分点。对优化因素进行试验验证,验证与优化结果基本一致,满足大蒜机械化收获高效切根作业要求。

关键词: 大蒜联合收获机; 切根装置; 作业机理; 试验

中图分类号: S225.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)10-0167-08

OSID: 

Operation Mechanism Analysis and Test of Press Root Cutting Device for Garlic Combine Harvester

HOU Jialin^{1,2} LI Chao^{1,3} LOU Wei^{1,2} LI Tianhua^{1,2} LI Yuhua^{1,2} ZHOU Kai^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Taian 271018, China
3. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to solve the problems of low root cutting rate and high bulb damage rate after cutting device in the process of garlic combined harvesting, a root cutting device was designed. The key parts of the root cutting device on garlic combine harvester mainly included clamping conveying mechanism and cutting mechanism. According to the structural characteristics and operation requirements of garlic combine harvester, the bulb and root could be separated automatically in the process of movement with the counter rotating disc cutter and pressing of shifting wheel. The dynamic and deformation model of shifting wheel pair and the mechanical model of root cutting were established to achieve the separation of bulb and root in this process. Taking sprocket speed, shifting wheel speed and disc cutter speed as test factors, taking garlic damage rate and root cutting rate as test index, the mathematical models of response values were established and regression analysis and response surface analysis were carried out. The test results showed that when the speed of sprocket was 107 r/min, the speed of paddle wheel was 52 r/min and the speed of disc cutter was 197 r/min, the performance of root cutting device of combined garlic harvester was the best, with the garlic damage rate of 0.63% and the root cutting rate of 97.07%. The optimization results were verified by tests, and the verification results were basically consistent with the optimization results. The research results could provide a technical reference for further exploring the technology of garlic combine harvester and bulb-root separator.

Key words: garlic combine harvester; root cutting device; operation mechanism; test

收稿日期: 2021-06-24 修回日期: 2021-07-31
基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-24-D-01)、泰山产业领军人才工程项目和山东省自然科学基金项目(ZR20220E103)
作者简介: 侯加林(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: jilhou@sdau.edu.cn
通信作者: 周凯(1987—),男,副教授,主要从事智能农业装备研究,E-mail: zhokai2017@sdau.edu.cn

0 引言

大蒜(*Allium sativum*)是一种重要的经济作物,拥有良好的食用价值与药用价值^[1-2]。中国是世界上最大的大蒜生产国与出口国,年出口量约占世界总贸易量 90%^[3]。但目前大蒜收获作业仍以人工为主,劳动强度大、生产效率低且劳动成本高,严重制约了我国大蒜产业的发展^[4]。

欧洲国家大蒜生产机械化起步较早^[5-6],CZ (Maquinaria Zocapi)、AR(JJ Broch)和 RE (ERME)等大型系列大蒜收获机^[7-8]可实现大蒜挖掘、夹持、切茎与收集。Yanmar 公司生产的 HZ 系列^[9]大蒜收获机作业效率低,切根后的大蒜仍需二次去根加工。中国研制的代表机型有:小型大蒜联合收获机^[10]与振动对行有序夹持大蒜收获机^[11]均可实现收获行距 180~220 mm 内大蒜植株的夹持与去茎收获。

根系净切率低与损伤率高是大蒜联合机械化收获过程中的难题^[12]。于昭洋等^[13]设计了一种浮动式切根装置,该装置可在鳞茎顶部对齐状态下完成根系浮动切割。CHEN 等^[14]提出了一种连杆咬合切削机构,找出大蒜最佳切根力,适用于大蒜的二次加工。

基于大蒜联合收获机结构特点与作业要求,本文设计一种按压式切根装置。采用斜拉式输送原理设计夹持输送机构,利用非平行式对齐方式满足纵向定位需求与移动链式对齐方式延长了定位区间;采用按压式原理设计蒜根切割机构,通过拨轮转动与按压变形使大蒜茎盘对齐,在圆盘刀对旋作用下,实现蒜根的切割。通过分析关键部件工作原理,确定了结构参数,构建大蒜夹持运动方程和拨轮组的动力、变形及切割力学模型。通过台架试验建立切根作业质量预测模型并进行双目标优化求解,得出最优参数组合,并进行试验验证,以期实现大蒜联合收获机按压式切根装置低伤蒜率与高净切率的作业要求。

1 结构与原理

按压式切根装置主要由夹持输送机构、切茎机构、切根机构和相应的调速电机与控制器等组成,大蒜联合收获中蒜根切割过程的试验平台如图 1 所示。

作业时,大蒜植株呈自然下垂状态送入到夹持输送机构喂入口并朝斜向上方夹持输送,当运动到切根机构时,减速电机 I 带动拨轮转动,实现蒜茎的咬合喂入,在旋转过程中拨齿逐渐滑移到蒜头顶端

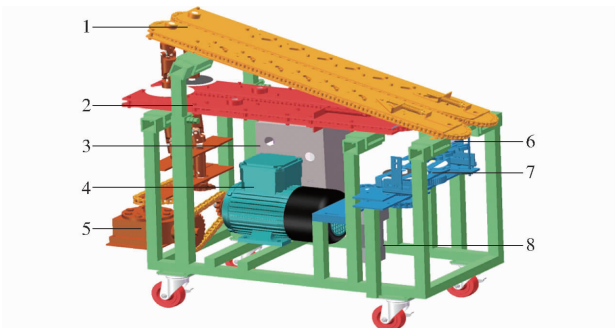


图 1 按压式切根装置结构示意图

Fig. 1 Schematic of pressing root cutting test-bed

1. 夹持输送机构 2. 切茎机构 3. 控制箱 4. 变频电机 5. 减速箱 6. 减速电机 I 7. 切根机构 8. 减速电机 II

并施力下压,茎盘贴合切割限位支架,减速电机 II 驱动圆盘刀转动,实现蒜根的切割,完成鳞茎与蒜根的分离,切割蒜根后的大蒜植株进入蒜茎切割机构,在夹持输送链条与鳞茎定位链条互相作用下,实现蒜头顶端对齐,电机驱动蒜茎切割机构的圆盘刀转动,进行蒜茎的切割,完成鳞茎与蒜茎的分离。

2 关键部件设计与参数确定

2.1 夹持输送机构

夹持输送过程主要分为:拔取阶段、定位阶段和保持阶段,分别实现大蒜从田间拔出并输送,鳞茎与定位单元距离缩短与运动姿态保持,如图 2 所示。

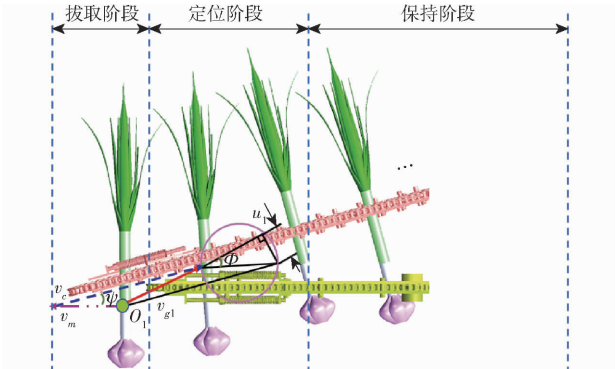


图 2 蒜株运动速度分析

Fig. 2 Analysis of movement speed of garlic plant

对拔取阶段前进速度与链条输送速度几何关系进行分析,合理设计夹持机构结构参数。在拔取阶段应满足^[15-16]

$$\begin{cases} v_c \sin(\Phi - \psi) = v_m \sin\Phi \\ \cos\psi = \frac{v_c^2 + v_m^2 - v_{g1}^2}{2v_c v_m} \end{cases} \quad (1)$$

整理后可得

$$\frac{v_c}{v_m} = \frac{\sin\Phi}{\sin(\Phi - \psi)} = k \quad (2)$$

式中 v_c ——链条线速度, m/s
 v_m ——大蒜联合收获机前进速度, m/s

k ——比例系数 ψ ——拉拔角, ($^{\circ}$)

Φ ——收获倾角, ($^{\circ}$)

v_{s1} ——大蒜植株实际运动速度, m/s

由于夹持链条线速度 v_c 较难测算, 因此使用从动链轮转速作为试验因素, 转速计算式为

$$n_c = \frac{60 \times 1\,000 v_c}{2\pi r_s} \quad (3)$$

式中 n_c ——从动链轮转速, r/min

r_s ——从动链轮分度圆半径, m

通过拉拔力测试试验^[16]可知, 当收获倾角 Φ 为 40° 时, 作业效果较好。通过文献^[11]可知, 大蒜收获机作业速度为 $0.34 \sim 0.74$ m/s, k 为 $2 \sim 3.1$ 时, 适合大蒜收获机夹持作业, 相关数值代入式(2)、(3), 可得链轮转速范围为 $96 \sim 322$ r/min。

2.2 蒜根切割机构

蒜根切割机构如图 3 所示, 在矫正区域, 通过拨轮转动与形变实现蒜茎拨送与鳞茎按压定位; 在切割区域, 通过茎盘位移限位与割刀对旋切割实现鳞茎与蒜根分离。

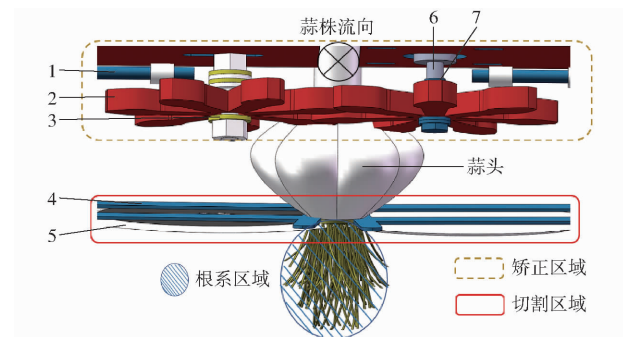


图 3 蒜根切割机构结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of cutting mechanism

1. 拨轮旋转轴 2. 拨齿 3. 拨轮垫 4. 切割限位支架 5. 圆盘切刀 6. 驱动轴 7. 安装轴座

2.2.1 定位拨轮结构设计

拨轮拨送鳞茎至蒜根切割区域的过程中, 应满足连续传动、单株拨送与拨齿变形条件, 拨轮结构及传动示意图如图 4 所示。

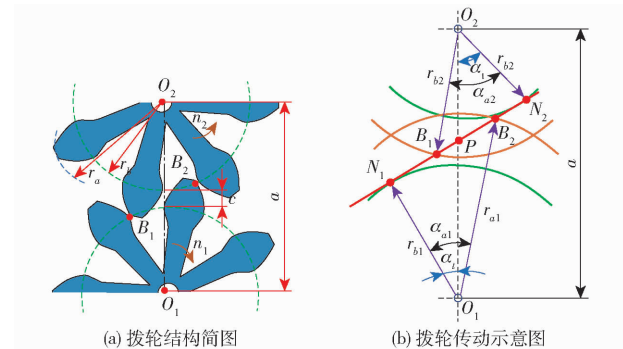


图 4 拨轮结构及传动示意图

Fig. 4 Diagrams of structure and transmission

受制于拨轮的设计参数, 中心距 a 大于等于标准啮合值 a_s , 即

$$a_s = r_{b1} + r_{b2} \leq a \quad (4)$$

式中 r_{b1}, r_{b2} ——驱动拨轮与从动拨轮半径

由图 4 可得到拨轮端面啮合角 α_i 与中心距 a 的数学关系^[17]为

$$\tan \alpha_i = \frac{\sqrt{a^2 - (r_{b1} + r_{b2})^2}}{r_{b1} + r_{b2}} \quad (5)$$

为保证齿轮对啮合的连续性^[18], 一般取重合度 $\varepsilon_a \geq 1.2$, 即

$$[z_1(\tan \alpha_{a1} - \tan \alpha_i) + z_2(\tan \alpha_{a2} - \tan \alpha_i)] / (2\pi) \geq 1.2 \quad (6)$$

式中 z_1, z_2 ——拨齿数目

整理式(5)、(6)可得

$$a \leq \frac{r_{b1} + r_{b2}}{z_1 + z_2}$$

$$\sqrt{(z_1 \tan \alpha_{a1} + z_2 \tan \alpha_{a2} - 2.4\pi)^2 + (z_1 + z_2)^2} \quad (7)$$

式中 α_{a1}, α_{a2} ——边缘压力角

依据渐开线齿轮设计原理与实际尺寸要求, 拨轮副设计参数如下: 拨齿数目 $z_1 = z_2 = 7$, 模数 $m = 12$ mm, 边缘压力角 $\alpha_{a1} = \alpha_{a2} = 45^{\circ}$, 数据代入式(4)、(7), 得齿轮中心距为 $840 \sim 925$ mm。

为实现连续挤压拨送蒜茎的目的, 探究拨轮运动与啮合冲击力的影响因素, 建立定位拨轮组动力模型, 如图 5 所示。

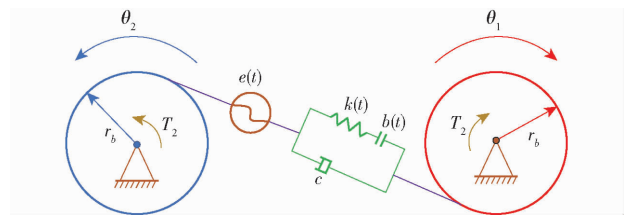


图 5 定位拨轮组动力模型

Fig. 5 Dynamic model of shifting wheel pair

忽略前后位移, 最终可得拨轮振动加速度、速度和位移的非线性啮合动力学方程以及由拨轮啮合刚度变化带来的啮合冲击力^[19]为

$$s(t) = m_e \ddot{x} + c \dot{x} + kx = -\Delta k(t)e(t) + s(t) + F_m \quad (8)$$

式中 $s(t)$ ——啮合冲击力, N

$\Delta k(t)$ ——拨轮啮合刚度变化量, N/m

F_m ——外部激励, N

$e(t)$ ——传动误差, mm

c ——阻尼系数, N·s/m

x ——动态传动误差, m

k ——时变接触刚度, N/m

m_e ——等效模量, kg

为了实现不同鳞茎的定位,因此拨齿会产生相应的变形,借鉴悬臂梁小变形模型^[20]的相关知识,建立拨齿变形模型,如图6所示。

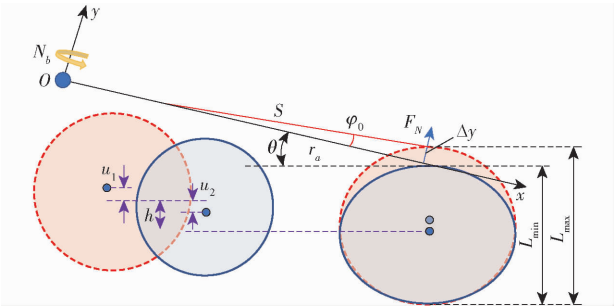


图6 拨齿的变形模型

Fig.6 Deformation model of gear shifting

建立笛卡尔坐标系 xOy , 原始拨齿轴线方向设为 x 轴方向, y 轴斜向上垂直于原始拨齿轴线。引入拉格朗日坐标, 即弧长 s , 用来定义端点在变形过程中的位置。对悬臂梁平衡方程^[21] 整理后, 可以得到

$$\frac{dy}{d\varphi} = \sqrt{\frac{2F}{EI}}(\sin\varphi_0 - \varphi)^{1/2} = \sin\varphi \tag{9}$$

式中 F ——拨齿变形载荷
 E ——拨齿杨氏模量
 I ——拨齿横截面惯性矩
 φ ——拨齿轴上任意一点倾斜角
 φ_0 ——拨齿轴自由端倾斜角

若拨齿轴线不可伸长^[22], 且拨齿变形角较小时, $\sin\varphi \approx \varphi \approx \varphi_0$, 可得到

$$F = \frac{2EI\varphi_0}{r_a^2} \tag{10}$$

式中 r_a ——拨轮半径, m

对式(9)进行积分, 并结合式(10)得到拨齿最大挠度应大于鳞茎高度差, 即

$$\frac{Fr_a^3}{3EI} > \Delta h \tag{11}$$

式中 Δh ——鳞茎高度差
鳞茎垂直矫正应满足

$$2r_a \sin\theta \geq \Delta h + u \tag{12}$$

式中 u ——蒜头垂直分布偏差, mm
 θ ——拨轮按压倾斜角, $(^\circ)$

若拨齿每圈只拨送1株大蒜, 则能够实现大蒜植株单株连续喂入, 即

$$N_b \geq \frac{60v_c}{7S} \tag{13}$$

式中 S ——种植株距, mm
 N_b ——拨轮转速, r/min

经计算, $N_b \geq 46.77 \text{ r/min}$ 。若拨轮转速小于 46.77 r/min , 会造成大蒜植株拥堵; 若拨轮转速过大, 会造成蒜茎断裂与鳞茎损伤, 因此需通过试验寻

找拨轮转速 N_b 最佳值。

2.2.2 圆盘割刀设计

为满足蒜根切断条件, 将茎盘切割平面简化为圆形, 在切割过程中, 鳞茎受到拨轮拨送力与链条拉力的合力 T , 垂直于刃口和平行刃口方向摩擦力 f_1 与 f_2 , 如图7所示。

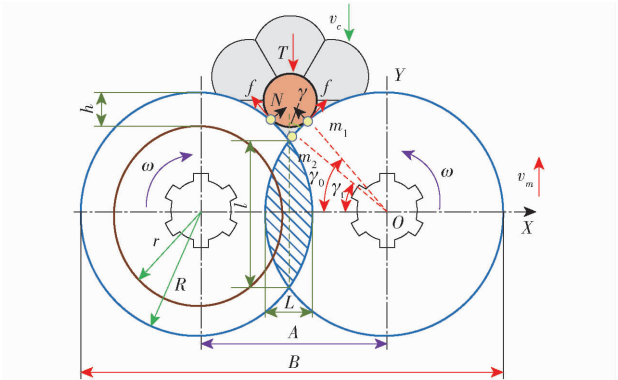


图7 双圆盘旋转切割刀盘设计示意图

Fig.7 Design diagram of double disc rotary cutter

建立蒜根切割力学模型为^[23]

$$\begin{cases} T + 2f\cos\gamma > 2N\sin\gamma \\ f_s = \mu N \end{cases} \tag{14}$$

式中 γ ——圆盘刀切割角, $(^\circ)$
 μ ——茎盘与割刀摩擦因数
 f_s ——茎盘切割阻力, N

代入相关数据^[11], 由式(14)可得

$$T > 1\,710.6\sin\gamma - 342.12\cos\gamma \tag{15}$$

在蒜茎拉拔力范围内, 圆盘刀切割角为 $0^\circ \sim 55^\circ$, 满足切割角范围要求。

为探寻圆盘割刀运动状态对蒜根切割效果的影响, 在右侧圆盘割刀旋转中心建立坐标系, 机器前进方向为 Y 轴方向, X 轴水平垂直于机器前进方向。取切割过程任意时刻的运动进行分析, 经过时间 t 后, 切割点从 m_1 运动到 m_2 , 则切割刀运动方程^[24] 为

$$\begin{cases} x = v_m t + R\cos(\gamma_0 - \omega t) - R\cos\gamma_0 \\ y = R\sin(\gamma_0 - \omega t) - R\sin\gamma_0 \end{cases} \tag{16}$$

式中 R ——圆盘刀半径, m
 γ_0 ——切割点初始角, $(^\circ)$
 ω ——圆盘刀角速度, rad/s

根据切割空白区最小原则来达到较优的切割质量与较低的切割功耗目标, 圆盘刀切割进程应近似等于刀刃高度, 为保证切割刀刃全程参与切割, 应满足

$$\frac{2\pi R}{v_y} \geq \frac{h}{v_m} \tag{17}$$

$$\text{其中 } v_y = 2\pi Rn \tag{18}$$

式中 h ——刀刃高度, m
 n ——圆盘刀转速, r/min
 v_y ——圆盘刀切割线速度, m/s

切割试验表明, v_y 与 v_m 比值为 1.3 ~ 1.4 时切割效果较好, 功耗较低。考虑到作业速度和生产率的要求, 大蒜联合收获机作业速度为 0.34 ~ 0.74 m/s, 则圆盘刀转速 $n \geq 87$ r/min。

3 试验与结果分析

3.1 试验条件与方法

为确定大蒜联合收获机按压式切根装置最佳工作参数, 于 2021 年 5 月 10 日在山东农业大学智能农业机械装备实验室进行了台架试验, 试验品种为“金乡红蒜”, 如图 8 所示。



图 8 按压式切根装置台架试验

Fig. 8 Test on pressing root cutting test-bed

1. 夹持输送机构 2. 定位拨轮 3. 切根机构 4. 控制箱 5. 定位单元 6. 切茎机构

在大蒜植株的拔取阶段, 夹持装置带动鳞茎斜向上输送, 拨齿按压鳞茎使得蒜根进入切割装置, 在切根机构圆盘刀的对旋切割作用下, 实现了蒜根与鳞茎的分离; 在大蒜植株定位阶段, 鳞茎与定位板的距离逐渐接近, 直至鳞茎顶端与定位单元接触; 在大蒜植株保持阶段, 鳞茎顶端与定位单元始终处于接触状态, 不发生竖直方向的位移, 直到蒜茎与切茎机构的圆盘刀接触, 实现蒜茎与鳞茎的分离, 完成了大蒜的切割过程。

3.2 试验因素与指标选取

结合理论分析, 选用影响蒜根切割质量的链轮、拨轮和圆盘刀转速作为试验因素; 选用影响大蒜经济价值的伤蒜率和切净率作为试验评价指标。大蒜果肉或鳞茎内皮破损即为损伤, 鳞茎以外蒜根剩余量超过 5 mm 为切不净。伤蒜率为切伤鳞茎总质量与鳞茎总质量之比, 切净率为去除根系总质量与全部根系总质量之比。

3.3 试验方案

根据大蒜联合收获机按压式切根装置实际情况, 采用 Box - Behnken 中心组合试验方法进行试验设计, 试验因素编码如表 1 所示。为模拟实际收获情况, 每组试验随机挑选 5 株大蒜植株, 采用手持方式, 大蒜植株呈自然下垂姿态, 保持鳞茎顶端距离 15 ~ 25 mm 的高度, 在链条夹持端按顺序依次喂入,

株距间隔为 120 mm。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Coding of test factors				r/min
编码	因素			
	链轮转速 x_1	拨轮转速 x_2	圆盘刀转速 x_3	
-1	100	50	100	
0	200	55	150	
1	300	60	200	

3.4 试验结果与参数优化

依据大蒜联合收获机的田间作业要求, 将伤蒜率 y_1 与切净率 y_2 作为响应值, 对链轮转速 x_1 、拨轮转速 x_2 和圆盘刀转速 x_3 进行试验, 试验方案与结果如表 2 所示。

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Test scheme and results					
序号	因素			$y_1/\%$	$y_2/\%$
	$x_1/$	$x_2/$	$x_3/$		
	($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)		
1	300	55	200	2.83	87.49
2	200	55	150	0.71	90.23
3	100	50	150	0.55	94.47
4	300	50	150	4.13	86.48
5	200	55	150	0.58	89.45
6	200	55	150	0.54	87.15
7	300	55	100	2.74	87.85
8	200	55	150	0.69	88.03
9	300	60	150	2.58	85.37
10	100	60	150	2.15	89.62
11	100	55	100	0.63	92.18
12	200	60	200	1.65	87.13
13	200	60	100	1.37	86.52
14	200	55	150	0.62	87.38
15	100	55	200	0.96	96.52
16	200	50	100	1.15	88.32
17	200	50	200	1.29	90.26

采用 Design-Expert 8.0.5 软件对表 2 中数据进行了多元线性回归拟合及方差分析, 结果如表 3 所示。建立伤蒜率 y_1 、切净率 y_2 与链轮转速 x_1 、拨轮转速 x_2 、圆盘刀转速 x_3 的二次多项式回归模型。对伤蒜率 y_1 分析可知, 在 $P < 0.05$ 水平上 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_1^2 、 x_2^2 的系数显著, 其余不显著; 对切净率 y_2 分析可知, 在 $P < 0.05$ 水平上 x_1 、 x_2 、 x_1^2 的系数显著, 其余不显著。两模型 $P < 0.001$, 说明伤蒜率 y_1 和切净率 y_2 作为响应函数的回归模型显著, 失拟项 $P > 0.05$, 失拟不显著, 回归模型方程具有高度拟合性, 回归方程为

$$y_1 = 63.65 + 0.05x_1 - 2.55x_2 + 0.0021x_3 - 0.0016x_1x_2 + 0.0001x_1^2 + 0.03x_2^2$$

(19)

$$y_2 = 116.54 - 0.1x_1 - 0.27x_2 + 1.72x_1^2 \quad (20)$$

表 3 响应面方差分析

Tab.3 Variance analysis of response surface

指标	变异来源	平方和	均方	F	P
伤蒜率 y_1	模型	17.73	1.97	246.66	<0.001 **
	x_1	7.98	7.98	999.20	<0.001 **
	x_2	0.050	0.050	6.21	0.041 5 *
	x_3	0.088	0.088	11.04	0.012 7 *
	x_1x_2	2.48	2.48	310.61	<0.001 **
	x_1x_3	0.014	0.014	1.80	0.221 3
	x_2x_3	0.004 9	0.004 9	0.61	0.459 1
	x_1^2	4.86	4.86	608.97	<0.001 **
	x_2^2	1.78	1.78	222.57	<0.001 **
	x_3^2	0.032	0.032	4.01	0.085 2
	残差	0.056	0.008		
	失拟	0.035	0.012	2.27	0.222 3
	误差	0.021	0.005		
	总和	17.79			
切净率 y_2	模型	132.65	14.74	13.36	0.001 3 **
	x_1	81.98	81.92	74.23	<0.001 **
	x_2	14.82	14.82	13.43	0.008 0 **
	x_3	5.33	5.33	4.83	0.063 9
	x_1x_2	3.50	3.50	3.17	0.118 3
	x_1x_3	5.52	5.52	5.00	0.060 3
	x_2x_3	0.44	0.44	0.40	0.546 8
	x_1^2	12.82	12.82	11.61	0.011 3 *
	x_2^2	6.14	6.14	5.57	0.050 4
	x_3^2	2.81	2.81	2.55	0.154 4
	残差	7.72	1.10		
	失拟	0.55	0.18	0.10	0.955 1
	误差	7.18	1.79		
	总和	140.37			

注：** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)，* 表示差异显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。

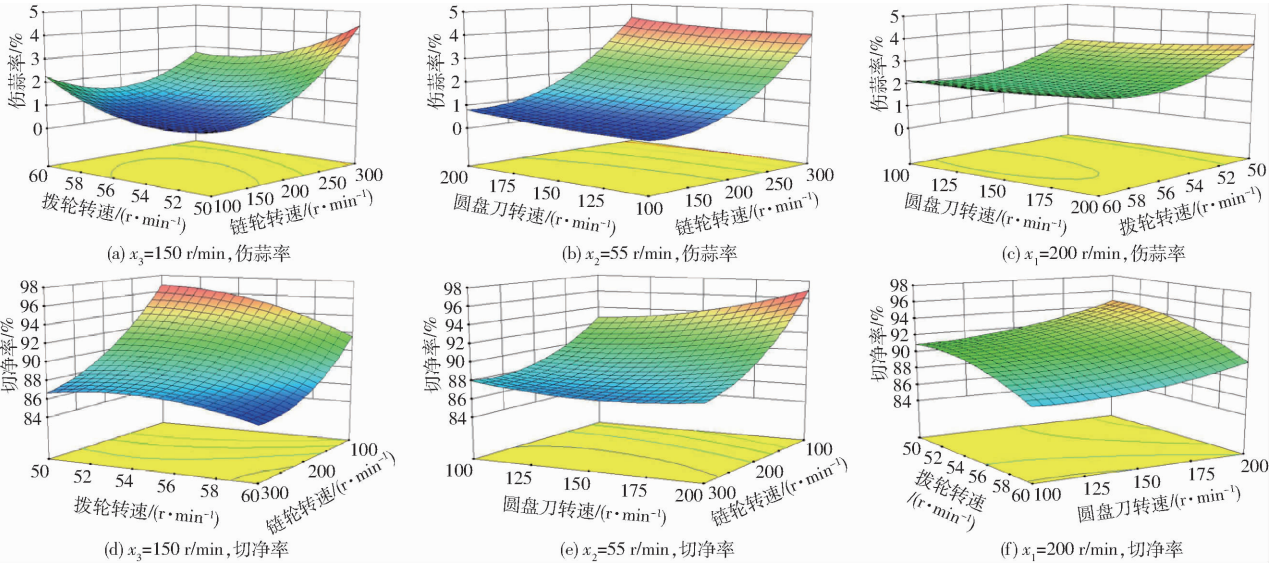


图 9 各因素交互作用的响应曲面

Fig.9 Response surfaces of interaction of various factors

利用 Box - Behnken Design 进行试验数据分析, 通过分析各项系数, 确定各因素对伤蒜率 y_1 和切净率 y_2 的影响, 各因素交互作用的响应曲面如图 9 所示。

由图 9a ~ 9c 可得, 输送速度越高, 圆盘刀转速越快, 伤蒜率越高。随着输送速度增加, 鳞茎和拨轮及定位单元等工作部件碰撞接触力增加, 导致伤蒜率升高。输送速度越低, 拨轮转速越低, 切净率越高。由图 9d ~ 9f 可得, 输送速度越高, 蒜头通过蒜根切割区域越快, 拨轮转速越快, 鳞茎矫正时间越短, 茎盘周边蒜根未得到有效切割, 导致切净率降低。

为得到大蒜联合收获机按压式切根装置较优的作业参数, 采用 Design-Expert 数据分析软件 Optimization 模块进行优化求解。设定约束条件: $\min y_1, \max y_2; 100 \text{ r/min} \leq x_1 \leq 300 \text{ r/min}, 50 \text{ r/min} \leq x_2 \leq 60 \text{ r/min}, 100 \text{ r/min} \leq x_3 \leq 200 \text{ r/min}$ 。优化得较优参数组合为: 链轮、拨轮和圆盘刀转速为 107.21、52.10、197.25 r/min; 此时模型预测伤蒜率和切净率为 0.64% 和 96.52%。

为确保优化试验准确性, 采用上述较优参数开展验证试验, 考虑到实际试验可操作性, 将参数修正为链轮、拨轮和圆盘刀转速为 107、52、197 r/min。试验可得伤蒜率和切净率为 0.63% 和 97.07%, 伤蒜率比理论模型降低了 0.01 个百分点, 切净率比理论模型提高了 0.55 个百分点。对比鳞茎顶端定位“浮动切根装置”的最优参数组合, 结果表明, 所提出的装置伤蒜率降低 2.15 个百分点, 切净率提高 3.9 个百分点。该装置有较强实用性, 能够满足大蒜联合收获时高效切根作业要求。

4 结论

- (1)设计了一种蒜根切割装置,通过拨轮转动与按压变形,实现茎盘对齐与蒜根切割,提高了净切率,降低了伤蒜率。
- (2)构建大蒜植株夹持运动方程,明确了大蒜植株运动的关键影响因素;建立拨轮组的动力与变形模型,得到了非标准啮合导致的拨轮位移、速度、振动加速度关系及因刚度变化引起的啮合冲击及挠度变形;创建蒜根切割力学模型与割刀运动学方程,确立了蒜根切断与刀刃全程切割条件。
- (3)通过响应面试验得到各因素对伤蒜率和切

净率评价指标的影响由大到小为:链轮转速、圆盘刀转速、拨轮转速与链轮转速、拨轮转速、圆盘刀转速。

(4)建立切根作业质量预测模型并进行双目标优化求解,得出最优参数组合。当链轮、拨轮和圆盘刀转速为 107、52、197 r/min 时,此时装置性能最优,伤蒜率和切净率为 0.63% 和 97.07%。对比鳞茎顶端定位“浮动切根装置”的最优参数组合,结果表明,所提出的装置伤蒜率降低 2.15 个百分点,切净率提高 3.9 个百分点。对优化因素进行试验验证,验证与优化结果基本一致,满足大蒜机械化收获高效切根作业要求。

参 考 文 献

[1] SHEN X L,SUN X Q,CAO M X,et al. Molecular markers for authentication of *Allium sativum* L. cultivar ‘Taicangbaisuan’ and genetic relationships among 9 Chinese garlic cultivars[J]. Genetic Resources and Crop Evolution,2021,68(5):1961–1970.

[2] LUO Q,HU S Z,LIN Q,et al. Complete genome sequence of a novel foveavirus isolated from *Allium sativum* L. in China[J]. Archives of Virology,2021,166(3):983–986.

[3] 侯加林,黄圣海,牛子孺,等. 双鸭嘴式大蒜正头装置调头机理分析与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(11):87–96.

HOU Jialin,HUANG Shenghai,NIU Ziru,et al. Mechanism analysis and test of adjusting garlics upwards using two duckbill devices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(11):87–96. (in Chinese)

[4] 李玉华,刘全程,李天华,等. 基于 Jetson Nano 处理器的大蒜鳞芽朝向调整装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(7):35–42.

LI Yuhua,LIU Quancheng,LI Tianhua,et al. Design and experiments of garlic bulbil orientation adjustment device using Jetson Nano processor[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(7):35–42. (in Chinese)

[5] 彭宝良,吕小莲,王海鸥,等. 半喂入自走式大蒜联合收获机[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):138–141.

PENG Baoliang,LÜ Xiaolian,WANG Haiou,et al. Half-feed and self-propelled garlic combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(Supp.):138–141. (in Chinese)

[6] 邢立冉,李汝莘,王铁新,等. 分置式大蒜收获机设计与仿真[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):137–140.

XING Liran,LI Ruxin,WANG Tiexin,et al. Design and analysis of split garlic harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(Supp.):137–140. (in Chinese)

[7] 王后新,李天华,吴彦强,等. 大蒜收获机械研究现状及展望[J]. 中国农机化学报,2018,39(6):102–107.

WANG Houxin,LI Tianhua,WU Yanqiang,et al. Research status and prospects of garlic harvesting machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2018,39(6):102–107. (in Chinese)

[8] HOU Jialin,LI Chao,ZHANG Zhilong,et al. Design and test of double-row walking garlic combine harvester[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(12):1–11.

[9] 张钟毓,魏静. 洋马 HZ20 型自走式大蒜收获机技术与效益分析[J]. 农业装备技术,2016,42(2):36–37.

ZHANG Zhongyu,WEI Jing. Technology and benefit analysis of YANMAR HZ20 self-propelled garlic harvester[J]. Agricultural Equipment and Technology,2016,42(2):36–37. (in Chinese)

[10] 徐文艺,张华,张志起,等. 小型大蒜联合收获机设计与试验[J]. 农机化研究,2016,38(11):186–189.

XYU Wenyi,ZHANG Hua,ZHANG Zhiqi,et al. Design and experiment of small garlic combine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(11):186–189. (in Chinese)

[11] 王利远. 振动对行有序夹持大蒜收获机的研制与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2019.

WANG Liyuan. Design and experiment of vibrating paired and orderly gripping garlic harvester[D]. Taian:Shandong Agricultural University,2019. (in Chinese)

[12] 于昭洋,胡志超,王海鸥,等. 大蒜果秧分离机构参数优化及试验[J]. 农业工程学报,2015,31(1):40–46.

YU Zhaoyang,HU Zhichao,WANG Haiou,et al. Parameters optimization and experiment of garlic picking mechanism[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(1):40–46. (in Chinese)

[13] 于昭洋,胡志超,杨柯,等. 大蒜收获机浮动切根装置作业机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报,2021,52(5):111–119.

YU Zhaoyang,HU Zhichao,YANG Ke,et al. Operation mechanism analysis and parameter optimization of garlic root floating cutting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(5):111–119. (in Chinese)

[14] CHEN J N,ZHOU B S,JIA J M,et al. Design and parameters optimization of root cutting tool based on garlic numerical simulation model[J]. Journal of Food Process Engineering,2021,44:e13753.

- [15] 张涛,李英,宋树民,等. 基于柔性夹持的青菜头收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):162-169.
ZHANG Tao, LI Ying, SONG Shumin, et al. Design and experiment of tumorous stem mustard harvester based on flexible gripping[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 162-169. (in Chinese)
- [16] 蔡佳麟,张佳喜,叶尔波拉提·铁木尔,等. 夹持带式棉秆收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):152-160.
CAI Jialin, ZHANG Jiaxi, YEERBOLATI · Tiemuer, et al. Design and test of clamping belt cotton straw harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 152-160. (in Chinese)
- [17] VAGHELA P, PRAJAPATI J. Integrated symmetric and asymmetric involute spur gear modelling and manufacturing[J]. Materials Today, 2020, 22(4): 1911-1920.
- [18] 张晋苹. 修形齿轮端面重合度的计算[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(1): 91-93.
ZHANG Jinping. Transverse contact ratio calculation of profile modification gear[J]. Machine Design and Research, 2018, 34(1): 91-93. (in Chinese)
- [19] XU R, ZHANG J, WANG J G, et al. Nonlinear dynamic modelling and analysis for a spur gear pair considering tooth profile deviation based on tooth contact analysis[J]. Journal of Vibration Engineering and Technologies, 2021, 9: 1039-1057.
- [20] QIAN Z J, JIN C Q, ZHANG D G. Multiple frictional impact dynamics of threshing process between flexible tooth and grain kernel[J]. Journal of Vibration Engineering and Technologies, 2017, 141(19): 276-285.
- [21] 黄小平,李善鹏,田诗豪,等. 刚性球冲击悬臂梁诱发的大位移研究:半解析解和试验[J]. 物理与工程, 2020, 30(5): 132-138.
HUANG Xiaoping, LI Shanpeng, TIAN Shihao, et al. Large displacement induced by a rigid sphere impact on cantilever: semi analytical solution and experiment[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(5): 132-138. (in Chinese)
- [22] WEI H, PAN O B, ADETORO E, et al. Dynamic large deformation analysis of a cantilever beam[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2020, 174: 183-204.
- [23] 王金武,关睿,高鹏翔,等. 胡萝卜联合收获机单圆盘对顶切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 73-81.
WANG Jinwu, GUAN Rui, GAO Pengxiang, et al. Design and experiment of single disc to top cutting device for carrot combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 73-81. (in Chinese)
- [24] 金鑫,杜新武,王世光,等. 胡萝卜收获机根茎分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 82-89.
JIN Xin, DU Xinwu, WANG Shiguang, et al. Design and experiment of stems cutting device for carrot harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 82-89. (in Chinese)

(上接第 125 页)

- [14] 宋欢. 定量螺旋输送机的优化设计及模拟[D]. 青岛:青岛科技大学, 2016.
SONG Huan. Optimization design and simulation of quantitative screw conveyor[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2016. (in Chinese).
- [15] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社, 2018.
- [16] 杨文武,方龙羽,罗锡文,等. 螺旋排肥器排肥口参数对排肥性能影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 1-8.
YANG Wenwu, FANG Longyu, LUO Xiwen, et al. Experimental study on the effect of the parameters of the spiral fertilizer feeder on the performance of the fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 1-8. (in Chinese)
- [17] 肖文立,廖宜涛,单伊尹,等. 油菜直播机四头螺旋双行排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 68-77.
XIAO Wenli, LIAO Yitao, SHAN Yiyin, et al. Design and experiment of quad-screw double-row fertilizer apparatus for rape seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 68-77. (in Chinese)
- [18] 机械设计选用手册编委会. 机械工程师手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [19] MOYSEY P A, THOMPSON M R. Modelling the solids inflow and solids conveying of single-screw extruders using the discrete element method[J]. Powder Technology, 2005, 153(2): 95-107.
- [20] 陈雄飞,罗锡文,王在满,等. 两级螺旋排肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 10-16.
CHEN Xiongfei, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of fertilizer distribution apparatus with double-level screws[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 10-16. (in Chinese)
- [21] 陈进,周韩,赵湛,等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 79-83.
CHEN Jin, ZHOU Han, ZHAO Zhan, et al. Analysis of rice seeds motion on vibrating plate using EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 79-83. (in Chinese)
- [22] YU Yaowei, HENRIKSAXE N. Experimental and DEM study of segregation of ternary size particles in a blast furnace top bunker model[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65: 5237-5250.
- [23] SUGIRBAY A M, ZHAO J, NUKESHEV S O, et al. Determination of pin-roller parameters and evaluation of the uniformity of granular fertilizer application metering devices in precision farming[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 179: 105835.
- [24] 汪小岳,陈满,孙国祥,等. 冬小麦变量施肥机控制系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊2): 88-92.
WANG Xiaoyue, CHEN Man, SUN Guoxiang, et al. Design and test of control system on variable fertilizer applicator for winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 2): 88-92. (in Chinese)