

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.01.014

# 大蒜联合收获机浮动式夹持装置设计与试验

侯加林<sup>1,2</sup> 李超<sup>1,3</sup> 娄伟<sup>1,2</sup> 周凯<sup>1,2</sup> 李玉华<sup>1,2</sup> 李天华<sup>1,2</sup>(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:** 针对大蒜联合收获机拉拔收获特点与鳞茎定位要求, 为提高输送成功率、降低鳞茎损伤率, 设计了一种浮动式夹持装置, 阐述了其主要结构与工作机理。通过茎秆受力变形与植株运动分析, 明确了试验台浮动轮弹性系数、间距及链条输送速度等关键作业影响参数的取值范围。构建了茎秆流变模型, 并根据不同载荷下的茎秆蠕变曲线拟合了茎秆的粘弹性参数, 明析了关键作业参数与输送装置夹持力、输送损失及鳞茎损伤的关系。以浮动轮弹性系数、间距及链条输送速度为试验因素, 以成功率和损伤率为试验指标, 用 Design-Expert 软件进行试验数据分析, 由 Origin 软件生成 3D 响应曲面, 得到各因素对指标的影响次序。结果表明, 当浮动轮弹性系数、间距及链条输送速度分别为 2 N/mm、83 mm 和 520 mm/s 时, 装置性能最优, 夹持成功率和损伤率分别为 97.42% 和 1.36%。对优化因素进行试验验证, 试验与优化结果基本一致, 满足大蒜联合收获浮动夹持高成功率与低损伤率的作业要求。

**关键词:** 大蒜联合收获机; 浮动式; 夹持装置; 流变模型

中图分类号: S225.92

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)01-0137-09

OSID:



## Design and Test of Floating Clamping Device for Garlic Combine Harvester

HOU Jialin<sup>1,2</sup> LI Chao<sup>1,3</sup> LOU Wei<sup>1,2</sup> ZHOU Kai<sup>1,2</sup> LI Yuhua<sup>1,2</sup> LI Tianhua<sup>1,2</sup>

(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 improve the success rate of conveying and reduce the damage rate of bulb, a floating clamping and conveying device was designed. According to the operation requirements of garlic combine harvester, multiple floating wheels were staggered in the working area and the chain tightness were adjustable, which met the needs of stable clamping. The rheological digital model of garlic stem was established, and the relationship between the key operation parameters on the clamping force of conveying device, conveying loss and bulb damage was analyzed. Taking the elastic coefficient of floating wheel, chain conveying speed and floating wheel spacing as test factors and the success rate and damage rate as test indicators, the test data were analyzed by Design-Expert software and the 3D response surface diagram was generated. The text results showed that when the elastic coefficient of floating wheel, chain conveying speed and floating wheel spacing were 2 N/mm, 520 mm/s and 83 mm, the performance of the device was the best, and the success rate and damage rate were 97.42% and 1.36%. 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 floating clamping conveyor.

**Key words:** garlic combine harvester; floating type; clamping conveyor; rheological model

收稿日期: 2021-08-07 修回日期: 2021-11-02

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现代农业产业技术体系蔬菜产业创新团队项目 (SDAIT-05-11)

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: jlhou@sdau.edu.cn

通信作者: 李天华 (1976—), 男, 教授, 主要从事智能农业装备和机械自动化研究, E-mail: lth5460@163.com

## 0 引言

大蒜联合收获包括挖掘、夹持、切茎、切根、收集等环节<sup>[1-4]</sup>。目前国内研制的振动对行有序夹持大蒜收获机<sup>[5]</sup>与双行手扶式大蒜联合收获机<sup>[6]</sup>可实现180~220 mm行距内大蒜的去茎收获。西方发达国家大蒜收获技术较成熟,西班牙CZ系列与AR系列大蒜收获机和法国RE系列大蒜收获机<sup>[7]</sup>可实现大蒜挖掘、夹持、切茎与收集。

柔性低损夹持<sup>[8]</sup>是果蔬收获所关注问题,果实流变特性<sup>[9]</sup>是衡量形变量与损伤之间关系常用的研究方法。ZOU等<sup>[10]</sup>采用流变模型分析了夹持装置的当量值与输送速度对菠菜损伤的影响。ZHANG等<sup>[11]</sup>基于输入力、接触时间和番茄粘弹性参数分析了不同抓取方式对红熟期番茄的影响。对于夹持装置作业参数变化引起的根茎类作物植株茎秆受力变形<sup>[12]</sup>对输送损失与定位损伤的影响鲜有报道。

针对大蒜联合收获机作业要求,本文设计一种交错浮动式夹持装置,实现大蒜植株可变刚度柔性夹持。通过茎秆受力变形与植株运动分析,确定装置关键作业参数,构建茎秆流变数字模型,并根据不同载荷下的茎秆蠕变曲线拟合茎秆的粘弹性参数,明析关键作业参数与输送装置夹持力、输送损失及鳞茎损伤的关系。建立夹持作业质量预测模型并进行优化求解,得出最优参数组合,并加以试验验证,以实现高成功率与低损伤率的夹持作业要求。

## 1 夹持装置结构与力学分析

### 1.1 结构与工作原理

拉拔收获原理<sup>[13]</sup>和根茎对齐原理<sup>[14]</sup>是大蒜、洋葱、胡萝卜、花生等作物普遍采用的收获原理,因此对夹持装置有夹紧和韧性要求,以便作物拔出输送与纵向滑移达到根茎顶端对齐。但输送过程易发生损失和损伤的问题,因此设计了一种浮动式夹持装置,工作区域内交错布置多个浮动轮,实现大蒜植株可变刚度柔性夹持。

浮动式夹持装置是大蒜有序收获的核心部件,主要由单向变频电机、减速箱、链条、浮动轮以及用于支撑的底板和机架组成,定位机构主要由切割刀下方的上下定位板与之间的链轮、链条、链条导轨等组成,实现茎秆的辅助输送与鳞茎滑移限位,如图1所示。

变频电机驱动链轮、链条转动,大蒜植株进入从动链轮间隙,随着链条的移动,从泥土中拔出并斜向上进行输送,浮动轮扭簧发生弹性形变,提供大蒜植

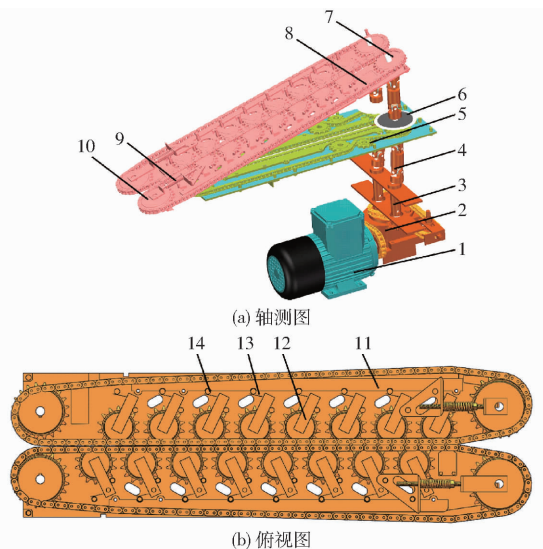


图1 浮动式夹持装置结构图

Fig. 1 Structural diagrams of floating clamping device

1. 单向变频电机
2. 减速箱
3. 轴套
4. 万向节
5. 定位板
6. 切割刀
7. 驱动链轮
8. 链条
9. 张紧器
10. 从动链轮
11. 链条导轨
12. 浮动轮
13. 扭簧
14. 支撑柱

株输送夹持力,当鳞茎与定位机构接触时,大蒜植株产生纵向滑移,在夹持装置末端茎秆与切割装置接触,实现蒜茎与鳞茎的分离。

### 1.2 浮动夹持机构设计

浮动夹持机构主要由支撑板、压板、浮动轮、扭簧、支撑柱等组成,通过扭簧发生弹性变形,提供大蒜植株夹持力,其结构如图2所示。

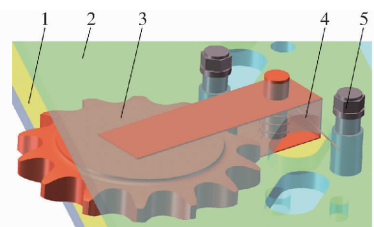


图2 浮动夹持机构结构图

Fig. 2 Structure diagram of floating clamping mechanism

1. 支撑板
2. 压板
3. 浮动轮
4. 扭簧
5. 支撑柱

#### 1.2.1 茎秆运动与受力分析

大蒜植株在夹持装置的作用下从田间拔出并输送,由于定位机构对鳞茎的限位作用,使得鳞茎上端对齐,以便夹持后期茎秆与鳞茎的切割分离。在大蒜植株拔取与定位阶段,从收获机前进速度、链条输送速度和茎秆变形速度之间的关系,进行链条拉拔角与茎秆单元压力关系分析,如图3所示。

在大蒜植株拔取阶段,收获机前进速度 $v_m$ 与输送速度 $v_c$ 应满足<sup>[15]</sup>

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

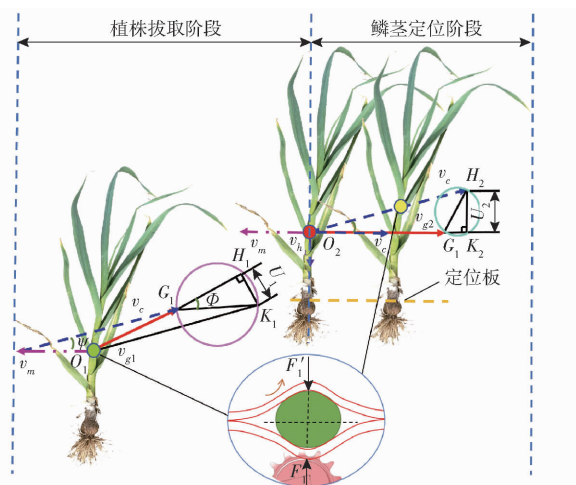


图 3 大蒜植株运动与受力分析

Fig. 3 Analysis of garlic plant movement and force

式中  $v_{g1}$ ——拔取阶段大蒜植株实际速度, mm/s

$\Phi$ ——收获倾角, ( $^\circ$ )

$\psi$ ——拉拔角, ( $^\circ$ )

在鳞茎定位阶段应满足

$$\begin{cases} v_h = v_c \sin\psi \\ \Phi = 0^\circ \\ v_{g2}^2 = v_c^2 - v_m^2 - v_h^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $v_{g2}$ ——定位阶段大蒜植株实际速度, mm/s

$v_h$ ——大蒜植株相对滑移速度, mm/s

大蒜植株在夹持装置首端喂入到稳定夹持输送过程中, 茎秆的变形量也逐步达到了最大值, 此时输送速度  $v_c$  和茎秆变形速度  $v_b$  应满足<sup>[10]</sup>

$$\frac{v_c}{v_b} = \frac{l}{D_0} = k \quad (3)$$

式中  $D_0$ ——茎秆变形量, mm

$l$ ——茎秆变形过程中输送距离, mm

$k$ ——比例系数

茎秆变形主应力是由浮动轮扭簧发生弹性变形造成的, 则茎秆单元压力  $p$  为

$$p = \frac{1\ 000 F_i}{Bd \cos\psi - \frac{1}{2} d^2 \tan\psi} \quad (4)$$

式中  $B$ ——茎秆夹持高度, mm

$d$ ——茎秆直径, mm

$F_i$ ——浮动轮施加给茎秆的挤压力, N

结合之前的研究, 当收获机前进速度为 340 ~ 740 mm/s, 链条输送与收获机前进速比为 2 ~ 3.1 较适合大蒜夹持输送<sup>[16]</sup>, 过快的输送速度会造成输送拥堵与损伤, 导致作业效率降低, 结合大蒜植株的物理力学特性试验研究<sup>[17]</sup>及机械传动设计、试验效果, 将试验台架输送速度范围设置为 500 ~ 1 500 mm/s。

### 1.2.2 茎秆变形分析

在浮动轮作用下, 大蒜植株呈 S 形线路输送, 如图 4 所示。

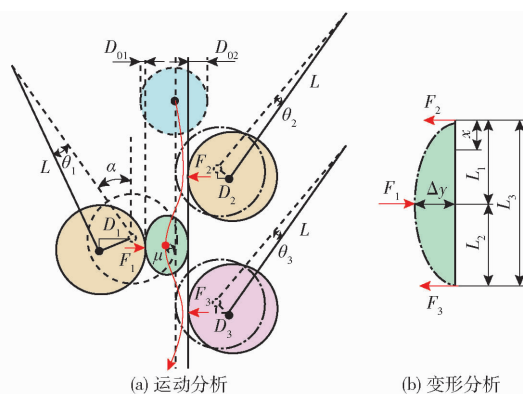


图 4 茎秆运动与变形分析

Fig. 4 Analysis of stem movement and deformation

茎秆弯矩可表示为<sup>[15]</sup>

$$E_s I_s \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{F_1 L_2}{L_3} \quad (5)$$

式中  $E_s$ ——茎秆弹性模量, MPa

$F_1$ ——浮动轮 1 施加给茎秆的挤压力, N

$L_2$ ——茎秆变形后段长度, mm

$L_3$ ——茎秆变形总长度, mm

$I_s$ ——茎秆转动惯量,  $N \cdot mm^2$

将公式(5)进行积分, 则茎秆夹持后的变形挠度  $\Delta y$  可表示为

$$\Delta y = \frac{F_1 L_2 L_1 L_3}{6 E_s I_s} \quad (6)$$

式中  $L_1$ ——茎秆变形前段长度, mm

茎秆的变形量应满足<sup>[18]</sup>

$$D_0 = D_h - \frac{2 F_1}{k_0} \quad (7)$$

式中  $D_h$ ——茎秆和扭簧总变形量, mm

$k_0$ ——浮动轮弹性系数, N/mm

引起茎秆形变的力可表示为

$$F_i = k_0 D_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

式中  $F_i$ ——浮动轮  $i$  施加给茎秆的挤压力, N

$D_i$ ——浮动轮  $i$  变形量, mm

随着浮动轮间距的增加, 浮动轮的变形量降低, 由公式(8)可知, 浮动轮施加给茎秆的挤压力降低, 由于浮动轮自身尺寸及旋转浮动和茎秆夹持变形挠度的需要, 因此将试验台架浮动轮间距范围设置为 70 ~ 100 mm。

扭簧产生的扭矩与力矩可表示为

$$\frac{\theta_1 EI}{\pi R_0 n} = F_1 L \sin\alpha \quad (9)$$

式中  $R_0$ ——扭簧中径, mm

$\theta_1$ ——浮动轮 1 扭转角  
 $E$ ——扭簧弹性模量, MPa  
 $I$ ——扭簧丝截面惯性矩,  $\text{mm}^4$   
 $L$ ——浮动轮扭转半径, mm  
 $\alpha$ ——浮动轮与前进方向的夹角, rad  
 $n$ ——扭簧有效圈数

根据浮动轮变形后的几何关系, 可得到

$$D_i = L\theta_i \cos\alpha \quad (i = 1, 2, 3) \quad (10)$$

式中  $\theta_i$ ——浮动轮  $i$  的扭转角, rad

通过公式(8)~(10)可得到浮动轮的弹性系数

$$k_0 = \frac{EI}{\pi R_0 n L^2 \sin\alpha \cos\alpha} \quad (11)$$

当浮动轮与前进方向的夹角为 0.13 rad 时, 较适合作物平稳夹持输送, 通过公式(11), 并结合扭簧参数与大蒜茎秆夹持特性, 将试验台浮动轮的弹性系数范围设置为 1~5 N/mm。

## 2 茎秆流变数字模型

### 2.1 Burgers 流变模型建立

新鲜茎秆表现出的流变特性与粘弹性特性, 可由一个包含弹性元件与粘性元件以及分布在两侧的一对独立的弹性元件和粘性元件组成的 Burgers 流变模型描述, 如图 5 所示。

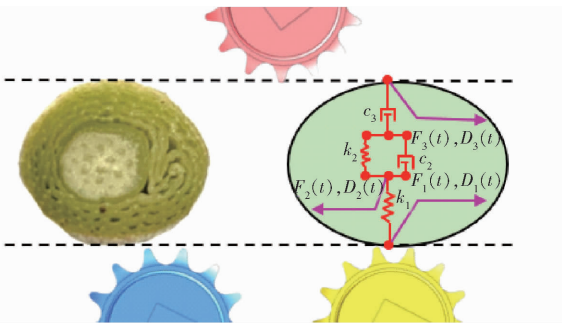


图 5 茎秆夹持的 Burgers 流变模型

Fig. 5 Burgers model of garlic stalk holding

基于每一层输入力  $F_i(t)$  与变形响应  $x_i(t)$ , 并结合公式(7), 可得到茎秆整体接触力  $F(t)$  与茎秆整体变形量  $x(t)$  的本构方程<sup>[19-20]</sup>

$$b_2 \ddot{x}(t) + b_1 \dot{x}(t) = a_2 \ddot{F}(t) + a_1 \dot{F}(t) + F(t) \quad (12)$$

$$\text{其中} \quad b_2 = \frac{c_2 c_3}{k_2} \quad (13)$$

$$b_1 = c_3 \quad (14)$$

$$a_2 = \frac{c_2 c_3 (k_1 + k_0)}{k_1 k_2 k_0} \quad (15)$$

$$a_1 = \frac{c_3 k_1 k_2 + k_0 (c_2 k_1 + c_3 k_1 + c_3 k_2)}{k_1 k_2 k_0} \quad (16)$$

式中  $k_1$ ——瞬时弹性系数, N/mm

$k_2$ ——延迟弹性系数, N/mm

$c_2$ ——并联粘性系数, N·s/mm

$c_3$ ——串联粘性系数, N·s/mm

### 2.2 Burgers 模型参数获取

田间生长的大蒜茎叶较柔软, 在夹持输送过程中, 茎秆实际压缩变形量发生改变。茎秆受力变形明显, 鳞茎定位阶段, 不易实现大蒜植株的滑移; 夹持装置施力过小, 茎秆受力变形作用不明显, 在自身重力和机器振动影响下, 越容易发生茎秆的垂直滑移, 造成鳞茎定位不精准问题。茎秆变形量反映夹持装置作用程度, 因此有必要估计粘弹性参数<sup>[21]</sup>来计算茎秆的变形。粘弹性参数流变模型可表示为

$$d(t) = F_0 \left[ \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} (1 - e^{-\frac{k_2}{c_2} t}) + \frac{t}{c_3} \right] \quad (17)$$

夹持链条由链板、链销、轴套等部件构成, 为实现根茎类作物的有效夹持, 非食用茎秆部分的受力变形效果显著(变形前后茎秆直径差异较大), 且茎秆变形区域内变形量趋于一致, 因此可忽略由链条结构特征对茎秆表型受力差异造成的影响。为得到新鲜茎秆受压变形后实际蠕变情况, 忽略表型受压差异影响, 茎秆受压面简化为平面, 使用 EZ-TEXT 型质构仪 (SES, 日本) 进行压缩蠕变试验<sup>[22-23]</sup>, 采用 P50 探头 (直径为 50 mm), 如图 6 所示。

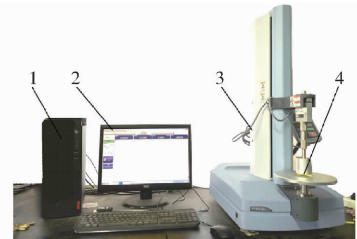


图 6 大蒜茎秆压缩蠕变试验装置

Fig. 6 Compression creep test device of garlic stalk

1. 主机 2. 显示器 3. 质构仪 4. 茎秆

采用成熟期“金乡红蒜”60 株, 距离鳞茎 200 mm, 截取长度 50 mm。探头加载速度 10 mm/min, 分别施加 3、5、7 N 的载荷, 恒定载荷保持阶段, 间隔 0.01 s 收集一次数据, 记录茎秆变形量随时间的变化关系, 如图 7 所示。

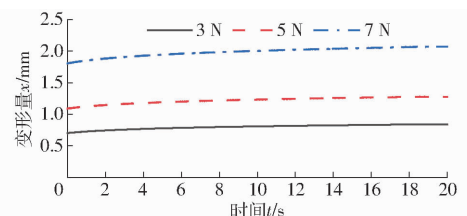


图 7 不同载荷下的茎秆蠕变曲线

Fig. 7 Stem creep curves under different loads

为得到茎秆的粘弹性参数, 采用 Matlab (R2018b) 软件拟合茎秆蠕变曲线与粘弹性参数求

解,结果如表1所示。

表1 茎秆蠕变模型参数拟合结果

Tab.1 Fitting results of parameters of stem creep model

载荷 $F_0/N$	$k_1/$ ( $N \cdot mm^{-1}$ )	$k_2/$ ( $N \cdot mm^{-1}$ )	$c_2/$ ( $N \cdot s \cdot mm^{-1}$ )	$c_3/$ ( $N \cdot s \cdot mm^{-1}$ )
3	4.2	36.8	147.7	1 048.0
5	4.6	48.0	190.5	1 174.0
7	3.9	49.4	190.8	1 120.0
平均值	4.2	44.7	176.3	1 114.0

拟合系数均大于0.9995,构建的流变模型能够很好地表示茎秆的挤压蠕变特性,茎秆蠕变拟合曲线如图8所示。

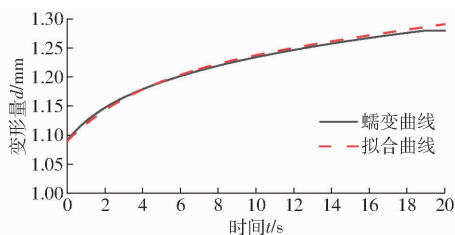


图8 茎秆蠕变拟合曲线

Fig.8 Creep fitting curves of garlic stalk

### 3 作业参数对装置夹持力的影响分析

#### 3.1 浮动轮弹性系数

结合浮动轮变形与夹持力和鳞茎穿刺损伤的条件可知,浮动轮的弹性系数应满足

$$\frac{1\ 000mg\gamma}{2\mu D_0} \leq k_0 \leq \frac{F_p}{2\mu D_0} \quad (18)$$

式中  $m$ ——大蒜植株质量,g

$g$ ——重力加速度, $m/s^2$

$F_p$ ——大蒜鳞茎损伤穿刺破坏力,N

$\gamma$ ——浮动夹持安全系数,N/mm

$\mu$ ——输送链与茎秆的静摩擦因数

大蒜植株稳定输送过程,茎秆变形为常量,即茎秆整体变形量  $x(t) = 0$ ,当  $k_0 = 1\ N/mm$  时,代入公式(12)得

$$5\ 440\ddot{F}(t) + 1\ 408\dot{F}(t) + F(t) = 0 \quad (19)$$

得  $F(0) = 2.6\ N$ ,  $F(10) = 2.1\ N$ ,可求得夹持力与时间的关系式为

$$F(t) = 0.51e^{-0.26t} + 2.09e^{-0.0014t} \quad (0 \leq t \leq 20\ s) \quad (20)$$

同理可得到  $k_0 = 3\ N/mm$  与  $k_0 = 5\ N/mm$  时对应的夹持力随时间变化函数: $F(t) = 1.5e^{-0.26t} + 5.2e^{-0.0015t}$  ( $0 \leq t \leq 20\ s$ )、 $F(t) = 1.7e^{-0.26t} + 8.4e^{-0.0019t}$  ( $0 \leq t \leq 20\ s$ ),如图9所示。

当浮动轮的当量弹性系数越小,夹持力越小,导致大蒜损失;当浮动轮的弹性系数越大,夹持力越大,鳞茎顶部易磨损与淤伤。

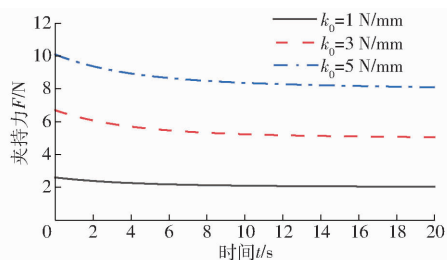


图9 不同弹性系数时夹持力随时间变化曲线

Fig.9 Clamping force with time for different elastic coefficients

#### 3.2 浮动轮间距

当  $l = 85\ mm$  时,对应的夹持力随时间变化函数为  $F(t) = 1.5e^{-0.26t} + 5.2e^{-0.0015t}$  ( $0 \leq t \leq 20\ s$ ),当  $l = 70\ mm$  与  $l = 100\ mm$  时对应的夹持力随时间变化函数分别为: $F(t) = 1.4e^{-0.26t} + 5.1e^{-0.0015t}$  ( $0 \leq t \leq 20\ s$ )与  $F(t) = 1.7e^{-0.26t} + 6.7e^{-0.0015t}$  ( $0 \leq t \leq 20\ s$ ),不同浮动轮间距的夹持力随时间变化的曲线如图10所示。

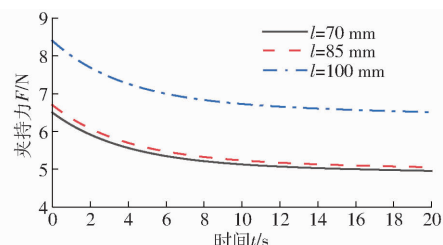


图10 不同浮动轮间距时夹持力随时间变化曲线

Fig.10 Clamping force with time for different wheel spacings

当浮动轮间距越小,夹持力越小,当减小到一定程度后变化不大。浮动轮间距越大,摆动行程越大,链条变形显著,易导致大蒜损失。

#### 3.3 链条输送速度

当  $v_c = 1\ 000\ mm/s$  时,对应的夹持力随时间变化函数为  $F(t) = 1.5e^{-0.26t} + 5.2e^{-0.0015t}$  ( $0 \leq t \leq 20\ s$ ),同理可得到  $v_c = 500\ mm/s$  与  $v_c = 1\ 500\ mm/s$  时对应的夹持力随时间变化函数: $F(t) = 0.9e^{-0.26t} + 5e^{-0.0015t}$  ( $0 \leq t \leq 40\ s$ )与  $F(t) = 1.6e^{-0.26t} + 6.5e^{-0.0015t}$  ( $0 \leq t \leq 13\ s$ ),不同链条输送速度的夹持力变化曲线如图11所示。

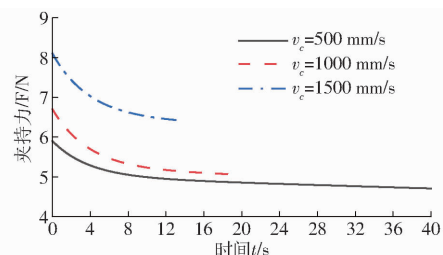


图11 不同输送速度时夹持力随时间变化曲线

Fig.11 Clamping force with time at different conveying speeds

当链条输送速度越慢,夹持力越小,工作效率越低;当链条输送速度越快,夹持力越大,工作效率越高,但容易造成鳞茎顶部受损。

## 4 试验与结果分析

### 4.1 试验条件与方法

为确定大蒜联合收获机夹持装置最佳工作参数,于2020年5月15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,如图12所示。试验品种为“金乡红蒜”,大蒜植株总长度为594~861 mm,鳞茎高度为33.53~50.86 mm,茎秆直径为11.24~18.45 mm,茎盘直径为19.21~30.35 mm,茎秆含水率为80.52%~81.59%,鳞茎含水率为30.08%~36.89%。

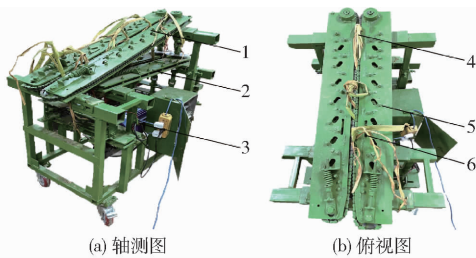


图12 大蒜植株夹持试验台架

Fig. 12 Bench test of garlic plant clamping

1. 夹持机构 2. 鳞茎定位机构 3. 变频调速电机 4. 大蒜植株  
5. 支撑柱 6. 浮动轮

### 4.2 试验因素与指标选取

选择浮动轮弹性系数、间距及链条输送速度作为试验因素,成功率和损伤率作为夹持作业的评价指标。若装置无法提供输送足够的夹持力,茎秆变形效果不显著,大蒜植株在自身重力与受润滑油与挤压受伤的蒜叶汁液影响的链条及机器运行振动作用下下滑掉落,在夹持装置末端,鳞茎未与定位机构的下定位板接触,即没有达到鳞茎的定位标准,则是夹持不成功。在鳞茎定位阶段,定位机构的两侧下定位板间隙大于茎秆直径,依靠鳞茎自身尺寸特征限制大蒜植株向上移动,实现水平输送效果,若装置提供较大的夹持力,茎秆变形效果显著,鳞茎与定位板间的摩擦增大,在大蒜植株横向输送与纵向滑移过程中就会造成鳞茎的顶端蒜皮脱落和果肉组织搓擦损伤<sup>[24]</sup>。夹持输送末端装有切割刀,以便实现茎秆(非食用部分)与鳞茎(食用部分)的分离,在大蒜植株夹持、定位和切割过程,成功率为达到鳞茎定位标准高度的鳞茎质量与总质量之比;损伤率为鳞茎顶部受损的鳞茎质量与总质量之比。

### 4.3 试验方案

采用三因素三水平正交试验设计,试验因素编码如表2所示。

表2 试验因素编码

Tab. 2 Coding of test factors

编码	因素		
	浮动轮弹性系数 $x_1/(N \cdot mm^{-1})$	浮动轮间距 $x_2/mm$	链条输送速度 $x_3/(mm \cdot s^{-1})$
-1	1	70	500
0	3	85	1 000
1	5	100	1 500

为模拟实际情况,在试验田随机挖取100颗并选择85颗健壮的大蒜作为试验样本,大蒜植株呈自然下垂姿态,采用手持方式依次喂入,夹持高度为鳞茎上端80~280 mm处,株距为120 mm,每组试验重复5次,试验结果取平均值。

### 4.4 试验结果与参数优化

根据实际作业要求,对浮动轮弹性系数、间距及链条输送速度进行试验研究,试验方案与结果如表3所示, $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 为因素编码值。

表3 试验方案与结果

Tab. 3 Test scheme and results

序号	因素			成功率 $Y_1/$	损伤率 $Y_2/$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	%	%
1	0	1	-1	95.83	0.39
2	1	0	-1	99.26	2.87
3	0	0	0	97.58	2.79
4	0	0	0	97.45	2.18
5	-1	0	1	95.94	1.86
6	0	-1	-1	98.56	2.31
7	0	0	0	97.48	2.92
8	0	1	1	97.83	2.93
9	1	-1	0	99.17	3.74
10	-1	-1	0	95.82	1.47
11	1	0	1	99.64	4.25
12	1	1	0	98.42	3.18
13	-1	0	-1	95.26	0.38
14	0	0	0	97.55	2.95
15	0	-1	1	97.28	2.17
16	0	0	0	97.69	2.46
17	-1	1	0	94.36	0.73

对表中数据进行了多元线性回归拟合及方差分析,结果如表4所示。

对成功率  $Y_1$  的数据分析可知,在  $P < 0.05$  水平上  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_1X_2$ 、 $X_2X_3$ 、 $X_1^2$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$  的系数显著, $X_1X_3$  不显著;对损伤率  $Y_2$  的数据分析可知,在  $P < 0.05$  水平上  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_2X_3$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$  的系数显著,其余不显著。成功率和损伤率回归模型显著,失拟不显著,剔除不显著变量项后,回归方程为

$$Y_1 = 97.55 + 1.89X_1 - 0.55X_2 + 0.22X_3 + 0.18X_1X_2 + 0.82X_2X_3 - 0.23X_1^2 - 0.38X_2^2 + 0.20X_3^2 \quad (21)$$

表 4 方差分析  
Tab. 4 Variance analysis

试验指标	变异来源	平方和	均方	F	P
成功率 $Y_1$	模型	35.17	3.91	452.32	<0.000 1
	$X_1$	28.54	28.54	3303.4	<0.000 1
	$X_2$	2.41	2.41	278.84	<0.000 1
	$X_3$	0.40	0.40	45.84	0.000 3
	$X_1X_2$	0.13	0.13	14.59	0.006 5
	$X_1X_3$	0.02	0.02	2.60	0.150 6
	$X_2X_3$	2.69	2.69	311.32	<0.000 1
	$X_1^2$	0.22	0.22	25.50	0.001 5
	$X_2^2$	0.60	0.60	69.91	<0.000 1
	$X_3^2$	0.17	0.17	20.23	0.002 8
	残差	0.060	0.009		
失拟	0.025	0.009	0.94	0.498 6	
误差	0.035	0.009			
总和	35.23				
损伤率 $Y_2$	模型	18.67	2.07	30.83	<0.000 1
	$X_1$	11.52	11.52	171.17	<0.000 1
	$X_2$	0.76	0.76	11.24	0.012 2
	$X_3$	3.46	3.46	51.39	0.000 2
	$X_1X_2$	0.008	0.008	0.043	0.738 8
	$X_1X_3$	0.003	0.003	0.037	0.852 6
	$X_2X_3$	1.80	1.80	0.12	0.001 3
	$X_1^2$	0.0001	0.0001	0.001	0.969 6
	$X_2^2$	0.62	0.62	9.27	0.018 7
	$X_3^2$	0.44	0.44	6.61	0.037 0
	残差	0.47	0.067		
失拟	0.032	0.011	0.097	0.957 4	
误差	0.44	0.11			
总和	19.14				

$$Y_2 = 2.66 + 1.20X_1 - 0.31X_2 + 0.66X_3 + 0.67X_2X_3 - 0.38X_2^2 - 0.32X_3^2 \quad (22)$$

利用 Design-Expert 软件进行试验数据分析并利用 Origin 软件生成 3D 响应曲面, 确定出各因素对成功率  $Y_1$  和损伤率  $Y_2$  的影响, 各因素交互作用对成功率和损伤率影响的响应曲面如图 13 所示。

浮动轮弹性系数越大, 夹持力越大, 夹持成功率越高; 浮动轮间距适中时, 浮动轮扭簧变形与链条位移互作影响较好, 夹持的成功率越高; 链条输送速度越高, 夹持效率越高。浮动轮弹性系数越大, 大蒜植株越不易发生纵向滑落, 鳞茎越容易定位挤压受损, 损伤率越高; 浮动轮间距越小, 浮动轮扭簧变形调节能力越差, 损伤率越高; 链条输送速度越大, 鳞茎受到的摩擦冲击越大, 损伤率越高。

采用 Design-Expert 软件, 进行作业参数优化求解。设定约束条件:  $\max Y_1, \min Y_2; 1 \text{ N/mm} \leq x_1 \leq 5 \text{ N/mm}, 70 \text{ mm} \leq x_2 \leq 100 \text{ mm}, 500 \text{ mm/s} \leq x_3 \leq 1500 \text{ mm/s}$ 。得到较优的参数组合为: 浮动轮弹性系数、间距及链条输送速度分别为 2.36 N/mm、83.08 mm 和 518.69 mm/s, 此时模型预测成功率和损伤率为 97.08% 和 1.41%。

为确保优化试验的准确性, 考虑到实际试验的可操作性, 将浮动轮弹性系数、间距及链条输送速度等参数修正为 2 N/mm、83 mm 和 520 mm/s, 此时成功率和损伤率为 97.42% 和 1.36%, 比理论模型分别提高 0.34 个百分点和减小 0.05 个百分点, 试验与优化结果基本一致, 满足大蒜联合收获高成功率

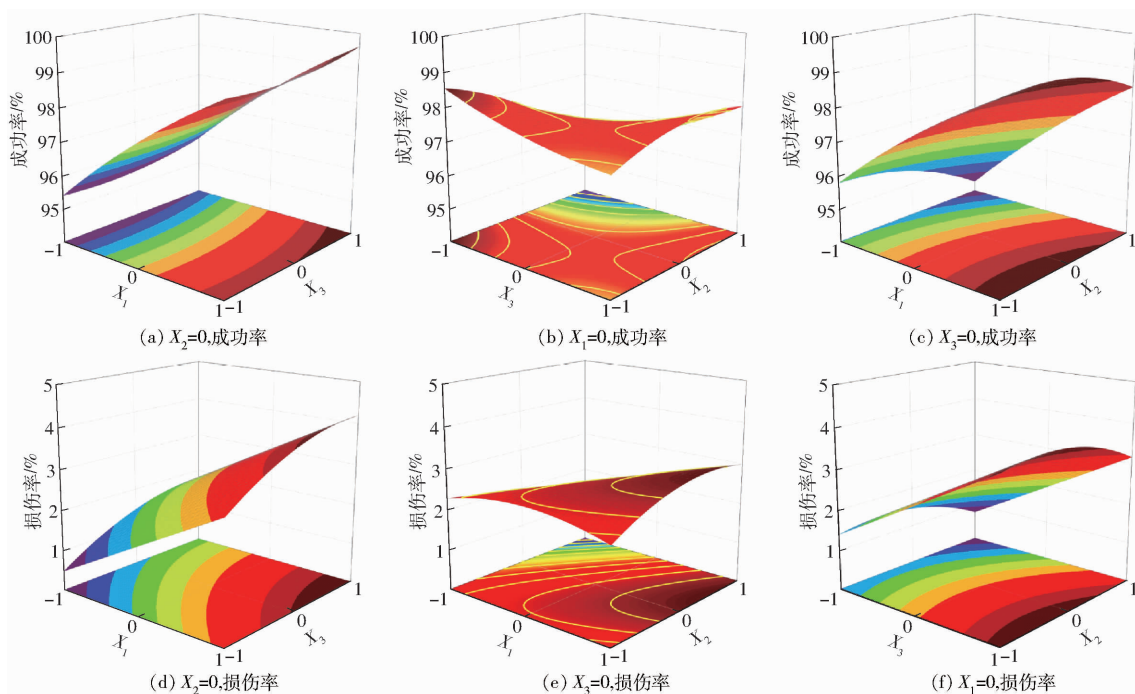


图 13 各因素交互作用对成功率和损伤率影响的响应曲面

Fig. 13 Response surface of interaction of various factors

与低损伤率的作业要求。

## 5 结论

(1)设计了一种浮动式夹持装置,通过交错式浮动轮的摆动,实现了大蒜植株变刚度柔性夹持,提高了输送成功率,降低了鳞茎损伤率。

(2)通过茎秆受力变形与植株运动分析,确定了关键作业参数,构建了茎秆流变数字模型,并根据不同载荷下的茎秆蠕变曲线拟合了茎秆的粘弹性参数,明析了关键作业参数与输送装置夹持力、输送损失及鳞茎损伤的关系,完善了根茎类作物夹持收获理论。

(3)通过响应面试验得到各因素对成功率影响主次顺序为:浮动轮弹性系数、浮动轮间距、链条输送速度,对损伤率的影响主次顺序为:浮动轮弹性系数、链条输送速度、浮动轮间距。

(4)通过台架试验建立夹持作业质量预测模型并优化求解,得出最优参数组合,当浮动轮弹性系数、间距及链条输送速度分别为 2 N/mm、83 mm 和 520 mm/s 时,装置性能最优,成功率和损伤率分别为 97.42% 和 1.36%。对优化因素进行试验验证,试验与优化结果基本一致,满足大蒜联合收获高成功率与低损伤率的作业要求。

## 参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] YU Z Y, HU Z C, PENG B L, et al. Experimental determination of restitution coefficient of garlic bulb based on high-speed photography[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2021, 14(2):81-90.
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 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.
- [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] 刘晓敏,田德宝,宋懋征,等. 气动力球果采摘柔性手爪设计与实验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):30-43. LIU Xiaomin, TIAN Debao, SONG Maozheng, et al. Design and experiment on pneumatic flexible gripper for picking globose fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2):30-43. (in Chinese)
- [9] JI W, QIAN Z J, XU B, et al. Apple viscoelastic complex model for bruise damage analysis in constant velocity grasping by gripper[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162:907-920.
- [10] ZOU L L, YUAN J, LIU X M, et al. Burgers viscoelastic model-based variable stiffness design of compliant clamping mechanism for leafy greens harvesting[J]. Biosystems Engineering, 2021, 208:1-15.
- [11] ZHANG B H, ZHOU J, MENG Y M, et al. Comparative study of mechanical damage caused by a two-finger tomato gripper with different robotic grasping patterns for harvesting robots[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171:245-257.
- [12] TOM L, BART S, HERMAN R, et al. A discrete element approach for modelling the compression of crop stems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123:80-88.
- [13] 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):162-169,190. 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(Suppl. 2):162-169,190. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 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 Jiayi, 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)
- [16] 李超. 手扶式大蒜联合收获机的设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2022. LI Chao. Design and test of walking garlic combine harvester[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [17] 辛杰. 大蒜物理力学特性试验研究与收获机关键装置设计[D]. 泰安:山东农业大学,2018.



- XIN Jie. Experimental study on physical and mechanical properties of garlic and design of key device of harvester[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [18] 邹亮亮,刘雪美,李金光,等. 基于流变特性分析的菠菜有序收获机夹持输送装置研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 72-79.
- ZOU Liangliang, LIU Xuemei, LI Jinguang, et al. Clamping conveyer device of ordered spinach harvester based on rheological property analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 72-79. (in Chinese)
- [19] OKUKA A S, ZORICA D, HERMAN R, et al. Fractional Burgers models in creep and stress relaxation tests[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 77(2): 1894-1935.
- [20] JI W, ZHANG J W, XU B, et al. Grasping mode analysis and adaptive impedance control for apple harvesting robotic grippers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 186: 1-13.
- [21] XIE F X, ZHANG D J, ZHOU A, et al. On the viscoelastic parameters of gussasphalt mixture based on modified burgers model: deviation and experimental verification[J/OL]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/4324765>.
- [22] 周俊,张娜,孟一猛,等. 番茄粘弹性参数机器人抓取在线估计[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 26-32.
- ZHOU Jun, ZHANG Na, MENG Yimeng, et al. Estimation of tomato viscoelastic parameters during robot grasping[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 26-32. (in Chinese)
- [23] 马瑞峻,萧金庆,郑普峰,等. 六盘水稻秧苗茎秆蠕变与应力松弛特性的试验研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 43-53.
- MA Ruijun, XIAO Jinqing, ZHENG Pufeng, et al. Experimental study on characteristics of creep and stress relaxation for rice seedling stem raised in cell tray[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 43-53. (in Chinese)
- [24] SCHEFFLER O C, COETZEE C J, OPARA U L, et al. A discrete element model (DEM) for predicting apple damage during handling[J]. Biosystems Engineering, 2018, 172: 29-48.

~~~~~

(上接第 74 页)

- [21] 李兆东,何顺,钟继宇,等. 油菜扰动气力盘式穴播排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 1-11.
- LI Zhaodong, HE Shun, ZHONG Jiyu, et al. Parameter optimization and experiment of the disturbance pneumatic plate hole metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17): 1-11. (in Chinese)
- [22] 于兴瑞,耿端阳,杜瑞成,等. 气力输送式小麦免耕施肥播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 141-148.
- YU Xingrui, GENG Duanyang, DU Ruicheng, et al. Design and experiment of wheat planter by pneumatic conveying with no tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 141-148. (in Chinese)
- [23] 蒋亚军,廖宜涛,秦川,等. 4SY-2.9 型油菜割晒机架振动分析及改进[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 53-60.
- JIANG Yajun, LIAO Yitao, QIN Chuan, et al. Vibration analysis and improvement for frame of 4SY-2.9 typed rape windrower[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 53-60. (in Chinese)
- [24] 王奇,朱龙图,李名伟,等. 指夹式玉米免耕精密播种机振动特性及对排种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 9-18.
- WANG Qi, ZHU Longtu, LI Mingwei, et al. Vibration characteristics of corn no-tillage finger-type precision planter and its effect on seeding performance[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 9-18. (in Chinese)
- [25] 谢瑞. 油菜扰动气力式排种器负压配气机构优化设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学, 2022.
- XIE Rui. Optimized design and experiment of negative pressure airflow distribution device of the perturbation pneumatic seed-metering device for rapeseed[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [26] 陈建国,李彦明,覃程锦,等. 小麦精量播种机排种高精度检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 66-74.
- CHEN Jianguo, LI Yanming, QIN Chengjin, et al. Design and experiment of precision detecting system for wheat planter seeding quantity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 66-74. (in Chinese)
- [27] 张春岭,吴荣,陈黎卿. 电控玉米排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 51-59.
- ZHANG Chunling, WU Rong, CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 51-59. (in Chinese)
- [28] 施印炎,陈满,汪小岳,等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 97-103.
- SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaoyue, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 97-103. (in Chinese)
- [29] 李兆东,杨文超,张甜,等. 油菜高速精量排种器槽齿组合式吸种盘设计与吸附性能试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 12-22.
- LI Zhaodong, YANG Wenchao, ZHANG Tian, et al. Design and suction performance test of sucking-seed plate combined with groove-tooth structure on high speed precision metering device of rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 12-22. (in Chinese)