

大蒜收获机浮动切根装置作业机理分析与参数优化

于昭洋^{1,2} 胡志超² 杨柯² 彭宝良² 张延化² 杨明金¹

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 为深入研究大蒜浮动切根装置的作业机理和作业质量提升技术途径,对大蒜根系浮动切割作业过程中的力学特性进行理论研究,推导了切根作业过程鳞茎碰撞动力学方程,得出鳞茎初始碰撞相对速度是影响碰撞损伤的关键参数;分析了根系滑切原理,建立了刀刃切割阻力力学模型,分析了根系群切割阻力的形成原因;运用高速摄影技术解析了鳞茎碰撞、根系群扰动和断裂等力学行为的产生过程。针对影响切根作业质量的主要因素进行了响应面试验,建立了伤蒜率、切净率预测数学模型,分析了各因素对伤蒜率、切净率的影响,并进行了综合参数优化,得到浮动切根装置较优参数组合为:输送速度 1 m/s、切刀转速 2 600 r/min、刃口倾斜角 33°、螺旋防护栅螺距 28 mm,试验测定伤蒜率为 2.78%,切净率为 93.17%,各项作业指标满足大蒜机械化收获切根作业要求。

关键词: 大蒜收获机; 浮动切根装置; 作业机理分析; 参数优化; 高速摄影

中图分类号: S225.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)05-0111-09 **OSID:** 

Operation Mechanism Analysis and Parameter Optimization of Garlic Root Floating Cutting Device

YU Zhaoyang^{1,2} HU Zhichao² YANG Ke² PENG Baoliang² ZHANG Yanhua² YANG Mingjin¹

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: The research on mechanized root cutting of garlic at home and abroad is still in the exploratory and experimental stage. Two key issues that remain unresolved in mechanized root cutting of garlic are low root cutting rate and high bulb bruise rate. In order to further study the operation mechanism and optimization design of garlic root floating cutting device, the theoretical study on the mechanical properties of root floating cutting process was carried out. The dynamics equations of bulb collision during root cutting were derived, and the relative velocity of bulb collision was the key motion parameter that affected the collision damage. The principle of root sliding cutting operation was analyzed, and the cause of root group cutting resistance was analyzed by establishing mechanical models of blade cutting resistance. The process of bulb collision, root group disturbance and fracture was analyzed by high-speed photography. The mathematical models were established to predict bruise rate and root cutting rate. The effects of various factors on bruise rate and root cutting rate were analyzed and the comprehensive optimization of various factors was carried out. The bruise rate was 2.78% and the root cutting rate was 93.17% under the optimal parameters of root floating cutting device with feed speed of 1 m/s, rotational speed of the cutter of 2 600 r/min, cutter angle of 33°, and spiral grating pitch of 28 mm. The research results can provide references for the research and mechanism design of garlic root cutting technique used in garlic combine harvester.

Key words: garlic harvester; root floating cutting device; operation mechanism analysis; parameter optimization; high-speed photography

收稿日期: 2021-01-27 修回日期: 2021-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51805282)、江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2020-24)和国家重点研发计划项目(2017YFD0701305-02)

作者简介: 于昭洋(1987—),男,博士生,农业农村部南京农业机械化研究所助理研究员,主要从事农作物收获装备研究,E-mail: 99zyzy99@163.com

通信作者: 杨明金(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与设施研究,E-mail: ymingjin@swu.edu.cn

0 引言

中国是大蒜主要生产国,中国大蒜出口量约占世界大蒜贸易量的 90%,已连续多年位居中国蔬菜出口量第一位^[1-3]。但中国大蒜生产机械化水平较低,尤其是收获环节,仍以人工作业为主,机械化收获面积不足 5%,严重制约了中国大蒜产业的健康发展。

大蒜收获作业主要包括挖掘、清土、切根、切茎和打捆等工序。切根是技术难度最大的环节,国内外关于大蒜机械化切根技术的研究尚处于探索和试验阶段,与大蒜机械化挖掘、清土、切茎和打捆等环节相比,技术成熟度差距较大^[4-7]。目前,中国已研发出二/四/六行切茎式大蒜联合收获样机^[8-10],单行/四行打捆式大蒜联合收获样机^[11-12],但尚无可完成切根作业的大蒜收获装备^[13]。发达国家的大蒜收获技术较为成熟,但由于切根难度大和种植规模小等因素,已研发的收获机具很少具有切根功能。法国 Erme 公司、西班牙 J. J. Broch 公司、丹麦 Asa-lift 公司为欧洲主要大蒜收获装备生产企业,生产的切茎式和打捆式大蒜联合收获机涵盖了 1~5 行系列产品。日本 Yanmar 公司生产的单行大蒜联合收获装备可依次完成蒜株挖掘、清土、切根、切茎等工序^[14],该机采用两片互相叠加、相向往复运动的锯齿刀切根,但刀片往复切割高度不能根据蒜头大小进行自动调整,蒜头适应性较差,实际切根作业效果不佳。

根系切净率低、鳞茎(蒜头)伤损率高是大蒜机械化切根技术尚未解决的两大关键问题。大蒜根部是由大量根须密集交织组成的根系群,根须横展、深度分布范围广,且根须一端与鳞茎连接,一端处于自由状态,切根装置需要解决无序、无支撑状态根系群的一次性高效切割问题。此外,大蒜根系着生部位的鳞茎大小各异、组织脆嫩,为降低鳞茎切割损伤和碰撞损伤,切根装置需要考虑不同鳞茎的适应性及接触部件的柔弹性。这些均对大蒜机械化切根技术提出了更高的要求。

基于大蒜联合收获机结构特点和作业要求,作者前期研发了一种大蒜联合收获浮动切根装置^[15],该装置可在鳞茎顶部对齐状态下完成根系浮动切割,但其作业性能和适应性有待提升。本文针对浮动切根装置进行切根作业过程力学特性理论研究和高速摄影试验研究,以伤蒜率、切净率为主控目标,对影响切根作业质量的主要因素进行分析,寻求各因素较优参数组合,以期为大蒜机械化收获切根技术的提升和机构优化提供参考。

1 结构与工作原理

1.1 浮动切根装置结构

浮动切根装置主要由对齐链、回形板簧、螺旋切刀、螺旋防护栅、仿形轮、弹簧等组成,如图 1 所示。回形板簧配置在鳞茎运行轨迹的两侧;螺旋切刀内置于螺旋防护栅中,由直流电机驱动旋转;螺旋防护栅两端固定在仿形轮内侧,无动力驱动,可自由转动,不与螺旋切刀同步转动。该装置可完成鳞茎柔性导向、上球面对齐、下球面仿形、根系浮动切割。

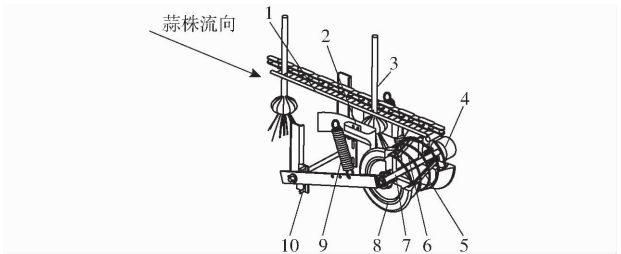


图 1 浮动切根装置结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of root floating cutting device

1. 对齐链 2. 回形板簧 3. 蒜株 4. 直流电机 5. 螺旋切刀
6. 螺旋防护栅 7. 传动轴 8. 仿形轮 9. 弹簧 10. 浮动限位板

1.2 切根试验台工作原理

为深入研究浮动切根过程力学行为产生过程、优化切根装置,本文构建了大蒜切根试验台,如图 2 所示。

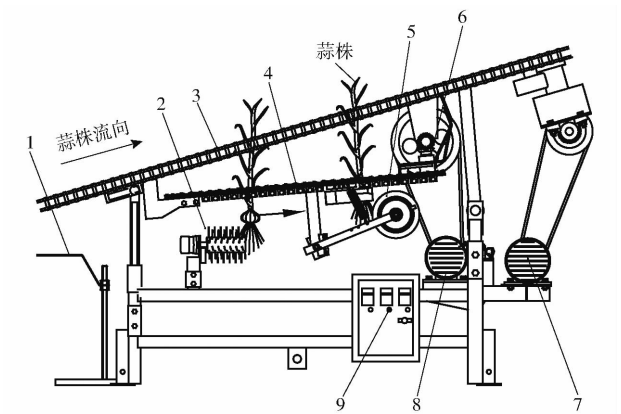


图 2 大蒜切根试验台结构简图

Fig. 2 Structure diagram of garlic root cutting test bench

1. 蒜株限位板 2. 毛刷辊 3. 夹持链 4. 对齐链 5. 浮动切根装置 6. 传动系统 7. 夹持链电机 8. 对齐链电机 9. 控制柜

作业时,蒜株在夹持链和对齐链的复式夹持作用下向后输送,毛刷辊首先作用于根系群,清理根系泥土、梳理并归拢杂乱的根系群;蒜株向后输送过程中,逐渐被夹持链向上拉动,使鳞茎上球面紧贴对齐链,鳞茎上球面对齐定位;同时,回形板簧引导并横向扶正鳞茎,避免鳞茎横向偏移;当鳞茎输送至螺旋防护栅前侧时,鳞茎底部逐渐抵压螺旋防护栅,使切

根装置紧贴鳞茎下球面而仿形浮动,内置的螺旋切刀快速旋转,将嵌入螺旋防护栅内的根系群去除,实现根蒜分离。

2 切根作业过程受力分析

切根是蒜株与切根装置相互作用的结果,研究作业过程蒜株受力行为,明确蒜株与切根装置相互作用关系,可为切根作业机理研究和机构优化提供理论基础。切根作业过程中,蒜株依次完成根系清

理、鳞茎横向扶正和对齐、根系浮动切割等阶段,各阶段对应的作业部件不同,蒜株受力形式和受力部位不同。

2.1 鳞茎碰撞接触力学分析

在切根作业过程中不可避免的会发生鳞茎碰撞,容易导致鳞茎的碰撞损伤。鳞茎碰撞主要发生在鳞茎横向扶正和对齐、根系浮动切割阶段。图 3 为切根过程的鳞茎碰撞示意图,点 M 和 N 附近为最有可能发生碰撞损伤的区域。

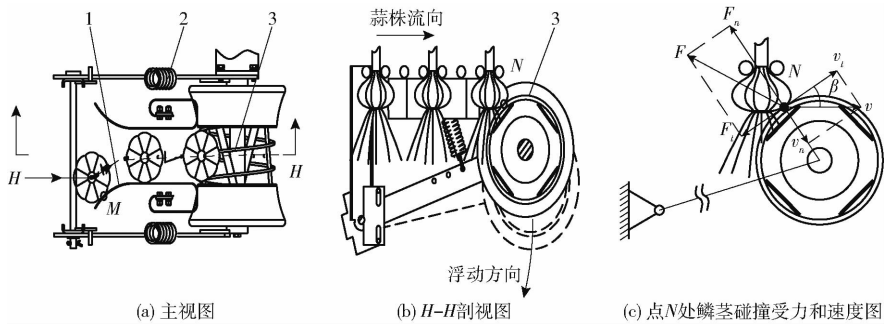


图 3 切根过程鳞茎碰撞示意图

Fig. 3 Schematics of bulb collision during root cutting

1. 回形板簧 2. 弹簧 3. 螺旋防护栅

以鳞茎与螺旋防护栅碰撞为例进行分析,碰撞瞬间鳞茎受力和速度如图 3c 所示。鳞茎以相对速度 v 与螺旋防护栅碰撞,鳞茎受到法向碰撞接触力 F_n 和切向摩擦力 F_t 作用。其中, F_n 使碰撞区的鳞茎组织法向速度 v_n 逐渐减小,并发生压缩形变。同时,螺旋防护栅在 F_n 反作用力作用下,产生法向速度和压缩形变。当鳞茎法向速度 v_n 减小至与螺旋防护栅法向速度相同,即两者相对速度为零时,鳞茎与螺旋防护栅相对位移不再减小,碰撞接触力增加至最大值 F_{nmax} ^[16]。此时,碰撞动能被局部弹塑性形变所吸收,即碰撞过程中法向接触力做功等于初始碰撞动能^[17-18],则

$$\frac{1}{2}mv^2\sin^2\beta = \int F_n ds = \lambda F_{nmax}s \quad (1)$$

其中

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}$$

式中 β ——碰撞点 N 切线与水平线夹角, ($^\circ$)

m ——鳞茎和碰撞体的等效质量, kg

m_1 ——鳞茎质量, kg

m_2 ——碰撞体质量, kg

s ——碰撞接触力位移, m

λ ——鳞茎吸收碰撞能量系数^[18]

由式(1)求得全碰撞过程中最大接触力 F_{nmax} 为

$$F_{nmax} = \frac{mv^2\sin^2\beta}{2\lambda s} \quad (2)$$

根据 Hertz 碰撞接触理论^[17], 鳞茎碰撞过程接触应力 P_n 为

$$P_n = \left(\frac{6F_nE^2}{\pi^3R^2} \right)^{1/3} \quad (3)$$

式中 E ——等效弹性模量, Pa

R ——等效相对曲率半径, m

将式(2)代入式(3), 求得全碰撞过程中最大接触应力 P_{nmax} 为

$$P_{nmax} = \left(\frac{3mv^2E^2\sin^2\beta}{\lambda\pi^3R^2s} \right)^{1/3} \quad (4)$$

碰撞过程中, 当最大接触应力 P_{nmax} 超过鳞茎弹性极限时, 鳞茎发生不可恢复塑性形变, 形成局部碰撞损伤。由式(3)、(4)可知, 鳞茎与碰撞体的最大接触力、最大接触应力与鳞茎初始碰撞相对速度、鳞茎与碰撞体的等效质量、碰撞点切线角度正相关, 与鳞茎吸收碰撞能量系数负相关; 最大接触应力与等效弹性模量正相关, 与等效相对曲率半径负相关。鳞茎初始碰撞相对速度为影响碰撞损伤的关键运动参数, 而鳞茎初始碰撞相对速度取决于夹持链和对齐链输送速度。

2.2 根系切割力学分析

2.2.1 根系滑切受力分析

大蒜根系切割为无支撑切割, 采用滑切方式可以增强刀刃微观状态下的锯断作用^[19], 降低根系切割比阻, 有效提高根系切净率。

图 4 为根系滑切原理图, 取刃口中点处根系质点 E 为研究对象, 质点 E 受力为刃口法向压力 P 和刃口的摩擦力 P_s , 其中 P 位于刃口 ef 与切刀运动速

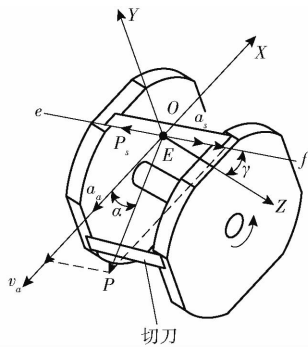


图 4 根系滑切原理图

Fig.4 Schematic of root slide cut

度 v_a 组成的切割面内。切割瞬间,根系由静止到速度陡增,获得较高瞬时加速度,并可分解为沿刃口 ef 和 v_a 方向的加速度 a_s 、 a_a 。则切割面内质点 N 沿刃口 ef 和 v_a 方向的动力学方程为

$$\begin{cases} \frac{P}{\cos\alpha} = m_E a_a \\ P \tan\alpha - P_s = m_E a_s \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$P_s = P \tan\varphi$$

式中 m_E ——质点 E 质量,kg

α ——滑切角, ($^\circ$)

φ ——根系与刃口摩擦角, ($^\circ$)

针对该切根装置,滑切角 α 等于刃口倾斜角 γ ,由式(5)可知,当 $\gamma > \varphi$ 时,形成滑切效应,且 γ 越大滑切作用越明显。但滑切角越大,质点 N 滑移距离越大,摩擦功耗显著增加。受空间尺寸限制 γ 的极限值为 37° 。

2.2.2 刀刃切割阻力分析

为深入研究根系群切割瞬间切刀切割阻力产生机理,本节从细观角度对刀刃切割阻力力系组成及力学模型进行分析。

切刀切割根系群时,刀刃的刃口、刃面是切断根系、承受切割阻力的主要部位。如图5所示,切刀断根瞬间刀刃切割阻力主要包括:刃口处根系群施加

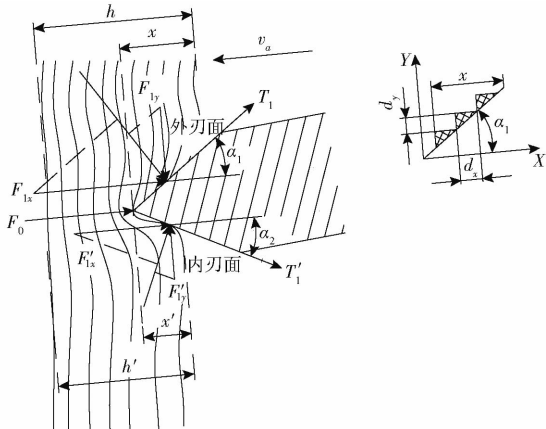


图 5 切割瞬间刀刃受力分析

Fig.5 Forces analysis of blade at cutting moment

的与切刀运动速度 v_a 反向的反作用力 F_0 ,被挤压根系群对外刃面挤压力 F_{1x} 、 F_{1y} 和摩擦力 T_1 ,被挤压根系群对内刃面挤压力 F'_{1x} 、 F'_{1y} 和摩擦力 T'_1 [18]。将根系群作为具有一定物理特性(弹性模量、挤压/剪切应力、泊松比等)的整体单元进行分析,首先利用微分思想对外刃面分割,外刃面微单元平面 X 方向(即切刀运动速度 v_a 方向)受到挤压力 dF_{1x} [18],则

$$dF_{1x} = \sigma_1 l dy = \sigma_1 l dx \tan\alpha_1 \quad (6)$$

式中 dx —— X 方向外刃面分割微单元,m

dy —— Y 方向外刃面分割微单元,m

l ——刀刃有效长度,m

σ_1 ——根系群在 X 方向的挤压应力,N/m²

α_1 ——外刃面与 v_a 夹角, ($^\circ$)

农作物茎秆群被挤压时其应力和应变可认为符合广义胡克定律,则根系群受到外刃面挤压时应力应变关系为 [18]

$$\varepsilon_x = \frac{x}{h} = k \frac{\sigma_1}{E_x} \quad (7)$$

式中 ε_x ——切刀上方根系群在 X 方向的应变

x ——切刀上方根系群被刃口挤压的厚度,m

h ——切刀上方根系群在 X 方向的总厚度,m

E_x ——根系群在 X 方向的弹性模量,Pa

k ——应变传递系数

将式(7)代入式(6),并对 dF_{1x} 积分,求得外刃面在 X 方向的挤压力 F_{1x} 为

$$F_{1x} = \int_0^x \sigma_1 l \tan\alpha_1 dx = \int_0^x \frac{x}{kh} E_x l \tan\alpha_1 dx = \frac{x^2 l}{2kh} E_x \tan\alpha_1 \quad (8)$$

外刃面微单元平面 Y 方向受到的挤压力 dF_{1y} 为 [18]

$$dF_{1y} = \frac{1}{k} \varepsilon_y E_y l dx = \frac{1}{k} \varepsilon_x \mu E_y l dx \quad (9)$$

式中 ε_y ——切刀上方根系群在 Y 方向的应变

μ ——根系群泊松比

E_y ——根系群在 Y 方向的弹性模量,Pa

外刃面在 Y 方向的挤压力 F_{1y} 为

$$F_{1y} = \int_0^x \frac{1}{k} \varepsilon_x \mu E_y l dx = \int_0^x \frac{x}{kh} \mu E_y l dx = \frac{x^2 l}{2kh} \mu E_y \quad (10)$$

外刃面受到的摩擦力 T_1 为

$$T_1 = \eta (F_{1x} \sin\alpha_1 + F_{1y} \cos\alpha_1) = \frac{\eta x^2 l}{2kh \cos\alpha_1} (E_x \sin^2\alpha_1 + \mu E_y \cos^2\alpha_1) \quad (11)$$

式中 η ——根系与刃面动摩擦因数

同理,求得内刃面受到的各项切割阻力为

$$\begin{cases} F'_{1x} = \frac{x'^2 l}{2kh'} E_x \tan \alpha_2 \\ F'_{1y} = \frac{x'^2 l}{2kh'} \mu E_y \\ T'_1 = \frac{\eta x'^2 l}{2kh' \cos \alpha_2} (E_x \sin^2 \alpha_2 + \mu E_y \cos^2 \alpha_2) \end{cases} \quad (12)$$

式中 x' ——切刀下方未切根系群被挤压厚度, m
 h' ——切刀下方未切根系群总厚度, m
 α_2 ——内刃面与 v_a 夹角, ($^\circ$)

刃口处受到的反作用力 F_0 为

$$F_0 = \delta l \sigma_0 \quad (13)$$

式中 δ ——刃口厚度, m
 σ_0 ——根系群极限剪切应力, N/m²
切刀断根瞬间, 刀刃受到的总切割阻力为

$$\begin{cases} F_X = F_0 + F_{1x} + T_1 \cos \alpha_1 + F'_{1x} + T'_1 \cos \alpha_2 \\ F_Y = T_1 \sin \alpha_2 - F_{1y} - T'_1 \sin \alpha_2 + F'_{1y} \end{cases} \quad (14)$$

式中 F_X ——切刀在 X 方向受到的总切割阻力, N
 F_Y ——切刀在 Y 方向受到的总切割阻力, N

为实现根系群切割, 刀刃必须克服式(14)中切割阻力 F_X 和 F_Y 。由上文理论分析可知, 当切刀运动速度大小一定, 刀刃的切割阻力与根系群物理特性(弹性模量、挤压/剪切应力、泊松比、根系群厚度等)、刀刃结构参数(刃口厚度、刀刃有效长度)有关, 还与刃面和切刀运动速度的夹角有关。刀刃结构参数确定后, 虽然外、内刃面角度已固定, 但由于切刀采用倾斜配置(如图 4 所示), 在刃口方向上, 刃面与切刀运动速度的夹角是变化的, 这种变化与刃口倾斜角 γ 有关。切割装置结构设计时, 为减小切割阻力, 应结合切割阻力力学模型, 综合考虑各因素影响。

3 试验

3.1 试验物料

蒜株于 2020 年 5 月取自山东省金乡县马庙镇

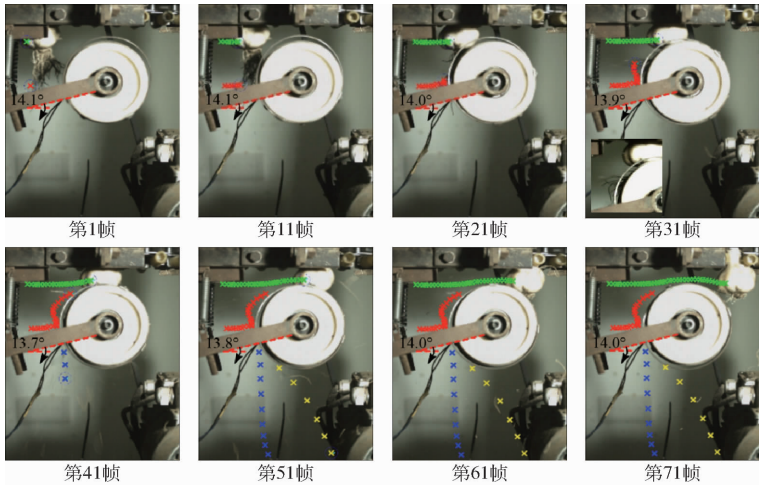


图 7 切根过程高速图像

Fig. 7 High speed images of root cutting process

试验田, 蒜株直立性较好, 全部蒜株于 1 h 内由人工完成松土起秧, 每株蒜根部带土单独装于密封袋内并冷藏。蒜株夹持状态下主根系长度 76 ~ 117 mm, 鳞茎直径 46 ~ 75 mm。筛选出鳞茎和根系群几何尺寸接近, 无病虫害、无损伤的蒜株作为试验物料。

3.2 高速摄影试验

3.2.1 试验设备

为深入分析切根作业过程鳞茎、根群与切根作业部件相互作用关系, 验证理论分析结果, 本文在构建的切根试验台上开展高速摄影试验, 试验现场如图 6 所示。利用 Fastec HiSpec 5 型高速相机记录切根过程鳞茎碰撞、根系群扰动、断裂等力学行为过程, 进一步揭示切根作业机理。探测器分辨率 1 696 像素 × 1 710 像素, 控制软件 HiSpec, 拍摄帧频率 250 f/s, 曝光时间 3 998 μ s。对齐链输送速度 1 m/s, 对齐链与夹持链速比为 1.02^[15], 螺旋切刀转速为 2 300 r/min, 刃口倾斜角 26 $^\circ$ 。为便于观察, 垂直于蒜株运动平面拍摄, 并拆除仿形轮。



图 6 高速摄影试验场景

Fig. 6 Test scene of high-speed photography

1. 大蒜切根试验台 2. 光源 3. 高速相机 4. 计算机及控制系统

3.2.2 切根过程高速图像解析

切根过程高速图像如图 7 所示, 图中特征点由 ProAnalyst 运动学分析软件逐帧捕捉。以根系群与切根装置相互作用初始时刻为零时刻, 设为第 1 帧

图像,每 10 帧获取一次高速图像,时间间隔为 0.04 s。

图 7 中采用绿色标记点对鳞茎特征点的运动位移逐帧标记。为便于分析,选择根系群左下部一点为根系特征点,采用红色标记点对其运动位移进行标记。第 1~11 帧,根系特征点的右侧部分逐渐进入切根装置,根系与鳞茎特征点相对位置无明显变化,说明被标记的根系未受到外力作用。第 21~41 帧,全部根系均已进入切根装置,根系特征点相对鳞茎向上移动,说明被标记的根系进入切根装置,受到切割力后并没有立即被切断,而是先发生了弯曲变形。通过试验观察,造成根系弯曲变形的原因有:先被切断的根系在脱离鳞茎飞出时,击打到未切根系,使其受力弯曲;切割线速度较小,根系不能产生足够的惯性力使其在直立状态下完成切割。第 71 帧,根系完全脱离切根装置,但根盘左侧存在少量根系未被切净。试验统计发现,根系切割后,残留根系群长度均为左侧长、右侧短,即右侧先切根系容易切净,左侧后切根系经过反复击打和弯曲变形使其自身韧性增强,不易被切断。

图 7 中随机选取 2 根被切断根系,分别采用蓝色和黄色标记点对运动位移逐帧进行标记。由第 51 帧蓝色、黄色标记点轨迹可知,已切根系沿切刀回转切线方向高速飞出,且脱离切根装置的初始位置集中在切刀回转圆周的第 3 象限。第 51 帧后根系飞出数量明显减小,说明根系切割作用主要集中在螺旋防护栅弧顶位置。

图 7 中两条红色虚线的夹角即切根装置的摆臂与水平线的夹角。从第 21 帧鳞茎与切根装置开始碰撞,到第 71 帧鳞茎脱离切根装置,整个过程摆臂角度变化不大,两者的碰撞并没有使切根装置发生大幅度浮动,整个切根过程切根装置始终紧贴鳞茎下球面。由此说明,螺旋防护栅和弹簧的弹性作用,有效减弱了两者碰撞产生的冲击力。

3.3 参数优化试验

3.3.1 作业指标

本文拟通过响应面试验,构建能够预测切根作业质量的多因素数学模型,进行浮动切根装置参数优化。根据收获后大蒜鳞茎贮藏要求,以伤蒜率 Y_1 、切净率 Y_2 作为切根作业指标。伤蒜率为碰伤、切伤鳞茎总质量与鳞茎总质量之比,切净率为已去除根系总质量与全部根系总质量之比。物料称量前清除鳞茎、根部泥土,于试验 7 d 后剥皮观察鳞茎的损伤。

3.3.2 试验设计

通过上文理论分析和前期试验^[20]可知,输送速度、螺旋切刀切割线速度和刃口倾斜角(图 4 中 γ

角)、螺旋防护栅螺距为影响切根质量的主要因素。输送速度指对齐链输送速度,对齐链与夹持链速比为 1.02^[15]。结构设计时切刀两端紧贴螺旋防护栅内侧,如刃口倾斜角增加,则切刀中段回转半径减小,切割线速度降低,因此,刃口倾斜角不易过大,在空间配置允许范围内最大值取 35°;为保证滑切效果,刃口倾斜角最小值取 17°。切刀转速越高,切割线速度越高,但转速过高,浮动切根装置振动明显,在保证浮动切根装置不发生明显振动条件下,切刀转速最大值取 2 600 r/min;考虑到刃口倾斜角增加后,切刀中段回转半径减小,切刀转速不易太低,为保证根系群有效切割,切刀转速最小值取 2 000 r/min。螺旋防护栅螺距越大根系群越容易嵌入切割,但过大会增加切伤的风险,而过小则根系群不能顺利嵌入切割,综合考虑鳞茎和根盘几何尺寸选取螺距最大值 40 mm、最小值 20 mm。由于回形板簧内侧增加橡胶垫,避免了鳞茎碰撞损伤,不再将回形板簧参数作为试验因素。

综上所述,以输送速度 X_1 、切刀转速 X_2 、刃口倾斜角 X_3 、螺旋防护栅螺距 X_4 为试验因素,伤蒜率 Y_1 、切净率 Y_2 为响应值,依据 Box-Behnken Designs 试验设计要求设计响应面试验^[21-22]。试验因素及编码如表 1 所示。山东大蒜主产区种植模式普遍采用等行距平畦密植,株距相对垄作较小,对行收获时喂入密度大,为模拟实际收获连续喂入工况,每次试验人工同时喂入 4 颗蒜株,蒜株前后间距同种植株距为 120 mm。由于蒜株直立性较好,联合收获时割台角度不变,则蒜株喂入时夹持链与茎秆的夹角基本保持不变,试验时固定该喂入角为 79°^[15]。

表 1 试验因素编码
Tab.1 Factors codes of response surface test

编码	因素			
	输送速度 $X_1/(m \cdot s^{-1})$	切刀转速 $X_2/(r \cdot min^{-1})$	刃口倾斜角 $X_3/(^{\circ})$	螺旋防护栅螺距 X_4/mm
-1	1.00	2 000	17	20
0	1.15	2 300	26	30
1	1.30	2 600	35	40

3.3.3 试验方案与结果

试验共 29 组,每喂入 50 次为 1 组,每组试验重复 3 次,取 3 次平均值。响应面试验方案与结果如表 2 所示。采用 Design-Expert 软件对表 2 试验结果进行多元回归拟合及方差分析,得到伤蒜率 Y_1 、切净率 Y_2 的回归模型及其回归项显著性结果如表 3 所示。

由表 3 可知,伤蒜率 Y_1 、切净率 Y_2 的回归模型均为极显著($P < 0.01$); Y_1 、 Y_2 回归模型失拟项均为不显著($P > 0.05$),回归模型拟合度较好。因此,可

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Experiment design and results

试验 序号	因素				响应值	
	$X_1/$	$X_2/$	$X_3/$	$X_4/$	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$(^\circ)$	mm		
1	1.15	2 600	26	20	3.57	91.93
2	1.15	2 300	26	30	3.87	89.16
3	1.15	2 000	26	20	3.43	85.64
4	1.30	2 300	17	30	5.01	84.06
5	1.00	2 000	26	30	2.83	90.83
6	1.15	2 300	26	30	3.38	89.31
7	1.00	2 300	26	20	2.75	90.59
8	1.15	2 000	26	40	4.82	87.56
9	1.15	2 600	17	30	3.66	89.16
10	1.15	2 600	26	40	4.63	91.97
11	1.15	2 000	35	30	3.17	86.08
12	1.00	2 300	26	40	3.32	92.13
13	1.30	2 000	26	30	4.69	83.56
14	1.15	2 300	17	40	5.19	86.65
15	1.15	2 600	35	30	3.30	91.64
16	1.30	2 600	26	30	5.21	86.85
17	1.30	2 300	26	20	4.37	84.13
18	1.15	2 300	26	30	3.67	88.92
19	1.15	2 300	35	40	3.83	88.36
20	1.00	2 300	35	30	2.99	91.38
21	1.15	2 300	26	30	3.55	88.34
22	1.00	2 300	17	30	3.25	90.05
23	1.30	2 300	26	40	5.38	85.87
24	1.15	2 300	35	20	3.31	87.76
25	1.15	2 000	17	30	3.99	86.42
26	1.30	2 300	35	30	4.96	84.57
27	1.15	2 300	17	20	3.33	86.75
28	1.15	2 300	26	30	3.23	89.36
29	1.00	2 600	26	30	3.19	93.26

用该模型对切根性能指标进行预测。在回归模型 Y_1 中,回归项 X_1 、 X_4 对 Y_1 影响极显著($P<0.01$),回归项 X_3 、 X_3X_4 、 X_1^2 、 X_4^2 对 Y_1 影响显著($P<0.05$),其他回归项对 Y_1 影响均不显著;在回归模型 Y_2 中,回归项 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_3^2 对 Y_2 影响极显著($P<0.01$),回归项 X_4 、 X_2X_3 、 X_1^2 对 Y_2 影响显著($P<0.05$),其他回归项对 Y_2 影响均不显著。通过 F 检验,判定影响 Y_1 的主次因素顺序为 X_1 、 X_4 、 X_3 、 X_2 ,影响 Y_2 的主次因素顺序为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 。将表 3 中回归模型不显著项剔除,保证模型极显著、失拟项不显著,重新拟合得到作业指标 Y_1 、 Y_2 的预测数学模型为

$$Y_1 = 11.04 - 21.56X_1 + 0.09X_3 - 0.012X_4 - 3.72 \times 10^{-3}X_3X_4 + 12.1X_1^2 + 2.7 \times 10^{-3}X_4^2 \quad (15)$$

$$Y_2 = 67.48 + 37.33X_1 + 7.78 \times 10^{-5}X_2 + 0.19X_3 + 0.05X_4 + 2.61 \times 10^{-4}X_2X_3 - 25.7X_1^2 - 0.01X_3^2 \quad (16)$$

3.3.4 试验因素对指标的影响分析

依据上述建立的两个作业指标的预测数学模型,分别选取对两个指标影响最重要的 3 个因素,采用 Matlab 软件绘制因素对指标响应的四维切片图^[23-24],如图 8、9 所示,为更加直观、准确分析各因素对试验指标的影响趋势,作图时适当增加各因素取值范围。

由图 8 可知,输送速度越高、螺旋防护栅螺距越大、刃口倾斜角越小,则伤蒜率越高。原因可能为:

表 3 响应面试验方差分析

Tab.3 Variance analysis of response surface model

方差来源	伤蒜率				切净率			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	16.350	14	13.95	<0.000 1	200.81	14	35.65	<0.000 1
X_1	10.620	1	126.91	<0.000 1	128.05	1	318.23	<0.000 1
X_2	0.033	1	0.40	0.537	50.92	1	126.55	<0.000 1
X_3	0.690	1	8.20	0.012 5	3.74	1	9.30	0.008 7
X_4	3.420	1	40.91	<0.000 1	2.75	1	6.82	0.020 5
X_1X_2	6.40×10^{-3}	1	0.076	0.786 2	0.18	1	0.46	0.508 9
X_1X_3	0.011	1	0.13	0.722 1	0.17	1	0.42	0.528 5
X_1X_4	0.048	1	0.58	0.459 6	0.01	1	0.03	0.877 0
X_2X_3	0.053	1	0.63	0.439 9	1.99	1	4.94	0.043 2
X_2X_4	0.027	1	0.33	0.577 5	0.88	1	2.20	0.160 5
X_3X_4	0.450	1	5.36	0.036 2	0.12	1	0.30	0.589 8
X_1^2	0.580	1	6.96	0.019 5	2.08	1	5.16	0.039 4
X_2^2	0.089	1	1.06	0.320 1	0.97	1	2.41	0.142 7
X_3^2	0.019	1	0.23	0.638 3	8.07	1	20.06	0.000 5
X_4^2	0.570	1	6.84	0.020 4	0.62	1	1.53	0.236 3
残差	1.17	14			5.63	14		
失拟项	0.92	10	1.49	0.372 4	4.94	10	2.86	0.161 7
误差	0.25	4			0.69	4		
总和	17.52	28			206.45	28		

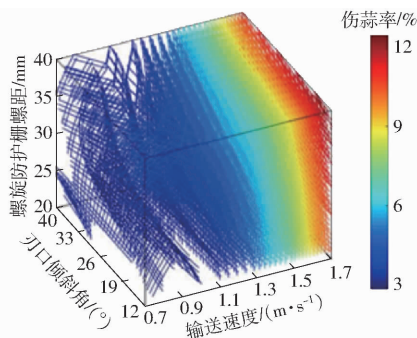


图 8 伤蒜率与输送速度、刃口倾斜角、螺旋防护栅螺距的四维切片图

Fig. 8 Four dimensional slice diagram of bruise rate with feed speed, cutter angle and spiral grating pitch

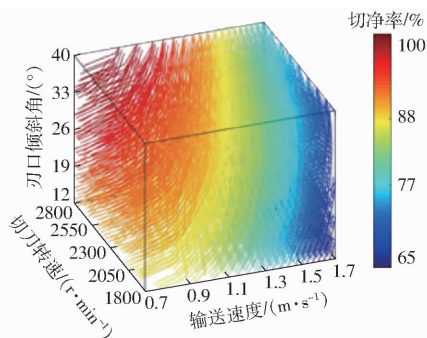


图 9 切净率与输送速度、切刀转速、刃口倾斜角的四维切片图

Fig. 9 Four dimensional slice diagram of root cutting rate with feed speed, rotational speed of cutter and cutter angle

当输送速度升高时,鳞茎与作业部件、鳞茎与鳞茎之间碰撞接触力增大,导致伤蒜率升高。螺旋防护栅螺距越大,鳞茎更容易透过螺旋防护栅,受到切刀切割作用,导致伤蒜率升高。由于切刀两端紧贴螺旋防护栅内侧,在割幅不变情况下,刃口倾斜角越小,螺旋切刀中段越接近螺旋防护栅弧顶位置,切刀更容易切到鳞茎,同时,螺旋切刀中段靠近螺旋防护栅弧顶,使切刀回转半径增大,切割线速度升高,也会导致伤蒜率升高。

图 9 为极显著因素对切净率的影响。由图 9 可知,切净率随输送速度升高、切刀转速降低而降低,随刃口倾斜角的增加,先升高后降低。原因可能为:输送速度升高,根系群通过浮动切根装置的时间缩短,使切割时间减小、切割次数减小,导致切净率降低。切刀转速降低,切割线速度降低,切割强度减小,导致切净率降低。刃口倾斜角增加,滑切角增大,切割阻力减小,切净率升高;但刃口倾斜角增加的同时,切刀中段也会逐渐远离螺旋防护栅弧顶位置,切刀回转半径减小,使根系切割长度减小、切割线速度降低,导致切净率降低。显著因素螺旋防护栅螺距对切净率影响趋势为:螺距越大根系群越容易嵌入切割,切净率越高。

3.3.5 参数优化与验证

为获取浮动切根装置较优参数组合,采用 Design-Expert 数据分析软件 Optimization 模块,结合伤蒜率和切净率优化数学模型,进行双目标优化求解。设定约束条件: $\min Y_1$, $\max Y_2$; $1.0 \text{ m/s} \leq X_1 \leq 1.3 \text{ m/s}$, $2\,000 \text{ r/min} \leq X_2 \leq 2\,600 \text{ r/min}$, $17^\circ \leq X_3 \leq 35^\circ$, $20 \text{ mm} \leq X_4 \leq 40 \text{ mm}$ 。优化得到的较优参数组合为:输送速度 1 m/s ,切刀转速 $2\,600 \text{ r/min}$,刃口倾斜角 33.45° ,螺距 27.52 mm ;此时模型预测伤蒜率为 2.72% ,切净率为 93.96% 。

为确保优化结果的准确性,采用上述较优参数组合开展验证试验。考虑试验操作的可行性,将参数修正为输送速度 1 m/s ,切刀转速 $2\,600 \text{ r/min}$,刃口倾斜角 33° ,螺距 28 mm 。验证试验重复 3 次取平均值。试验结果为伤蒜率 2.78% ,切净率 93.17% 。 Y_1 、 Y_2 的试验验证值与预测值差异很小,说明较优参数组合可靠。

4 结论

(1)建立了浮动切根作业过程鳞茎碰撞最大接触力和接触应力数学模型,得出鳞茎初始碰撞相对速度是影响碰撞损伤的关键参数;建立了滑切过程动力学方程,分析了根系滑切原理;推导了刀刃切割阻力力学模型,明确了根系群切割阻力的形成原因。

(2)通过高速摄影试验记录并解析了鳞茎碰撞、根系群扰动、断裂等力学行为的产生过程;已切根系的击打和切割线速度过小是根系发生弯曲的主要原因;根系群中后切的根系经过多次反复击打和弯曲变形,其自身韧性增强,不易被切断;根系切割作用主要集中在螺旋防护栅弧顶位置,已切根系沿切刀回转切线方向高速飞出,飞出初始位置集中在切刀回转圆周的第 3 象限。

(3)通过响应面试验得出,影响伤蒜率的主次因素依次为输送速度、螺旋防护栅螺距、刃口倾斜角、切刀转速,输送速度越高、螺旋防护栅螺距越大、刃口倾斜角越小,则伤蒜率越高;影响切净率的主次因素依次为输送速度、切刀转速、刃口倾斜角、螺旋防护栅螺距,切净率随输送速度升高、切刀转速降低、螺距增加而降低,随刃口倾斜角的增加,先升高、后降低。

(4)利用建立的切根作业质量预测数学模型进行了双目标优化求解,浮动切根装置较优参数组合参数为:输送速度 1 m/s 、切刀转速 $2\,600 \text{ r/min}$ 、刃口倾斜角 33° 、螺距 28 mm ,试验测定伤蒜率为 2.78% ,切净率为 93.17% ,各项作业指标满足大蒜机械化收获切根作业要求。

参 考 文 献

- [1] 赵帮宏. 中国大蒜产业发展研究报告[M]. 北京:经济管理出版社,2018.
- [2] 侯加林,黄圣海,牛子儒,等. 双鸭嘴式大蒜正头装置调头机理分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):87-96. HOU Jialin, HUANG Shenghai, NIU Zirui, et al. Mechanism analysis and test of adjusting garlies upwards using two duckbill devices [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 87-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181110&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.010. (in Chinese)
- [3] 耿爱军,栗晓宇,侯加林,等. 自动定向大蒜播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(11):17-25. GENG Aijun, LI Xiaoyu, HOU Jialin, et al. Design and experiment of automatic directing garlic planter [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 17-25. (in Chinese)
- [4] 吴彦强,李天华,林立恒,等. 圆盘式大蒜挖掘装置的设计与试验[J]. 中国农机化学报,2017,38(2):17-23. WU Yanqiang, LI Tianhua, LIN Liheng, et al. Design and experiment of disk digging device for garlic [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(2): 17-23. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 于昭洋,胡志超,王海鸥,等. 大蒜果分离试验装置的设计与测试[J]. 农业工程学报,2013,29(16):7-15. YU Zhaoyang, HU Zhichao, WANG Haiou, et al. Design and testing of picking device in garlic combine harvesting [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16): 7-15. (in Chinese)
- [7] SUN Qun, SUI Yongxiang, ZHAO Ling, et al. Design and development of self-propelled garlic harvester [J]. Agricultural Research, 2018, 7(4): 495-505.
- [8] 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):186-189,203. XU Wenyi, ZHANG Hua, ZHANG Zhiqi, et al. Design and experiment of small garlic combine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11): 186-189,203. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 赵东,蔡冬梅,秦理想,等. 模块化大蒜联合收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(4):95-102. ZHAO Dong, CAI Dongmei, QIN Lixiang, et al. Design and experiment of modularized garlic combine harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 95-102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200411&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.011. (in Chinese)
- [11] 申世龙,尚书旗,王东伟,等. 大蒜打捆收获机设计与试验分析[J]. 农机化研究,2018,40(10):109-113. SHEN Shilong, SHANG Shuqi, WANG Dongwei, et al. Design and experimental analysis of garlic bundling harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(10): 109-113. (in Chinese)
- [12] 宁金伟,苏本动,李淑谦,等. 打捆式大蒜联合收获机的研发与试验[J]. 农业装备与车辆工程,2019,57(12):41-43.
- [13] 杨柯,胡志超,彭宝良,等. 大蒜机械切须技术研究及试验[J]. 中国农机化学报,2015,36(3):153-159. YANG Ke, HU Zhichao, PENG Baoliang, et al. Research and test of garlic mechanical cutting roots technology [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(3): 153-159. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 于昭洋,胡志超,杨柯,等. 大蒜联合收获切根试验台设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(22):77-85. YU Zhaoyang, HU Zhichao, YANG Ke, et al. Design and experiment of root cutting device in garlic combine harvesting [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 77-85. (in Chinese)
- [16] 赵湛,李耀明,陈义,等. 水稻籽粒碰撞力学特性研究[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(6):88-92. ZHAO Zhan, LI Yaoming, CHEN Yi, et al. Impact mechanical characteristics analysis of rice grain [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 88-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130617&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.017. (in Chinese)
- [17] JOHNSON J K. Contact mechanics [M]. London: Cambridge University Press, 1985.
- [18] 卡那沃斯基. 收获机械 [M]. 曹崇文,吴春江,柯保康,等,译. 北京:中国农业机械出版社,1983.
- [19] 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选用[J]. 华中农学院学报,1982,6(1):64-69.
- [20] 杨柯. 大蒜切须技术研究及机构优化设计 [D]. 北京:中国农业科学院,2015. YANG Ke. Research and optimization design of cutting mechanism in garlic combine harvesting [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. (in Chinese)
- [21] 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert, SPSS 应用 [M]. 北京:科学出版社,2010.
- [22] 李玉华,张智龙,李天华,等. 轮勺式大蒜单粒取种装置设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报,2020,51(3):62-68. LI Yuhua, ZHANG Zhilong, LI Tianhua, et al. Design and experiment of wheel-spoon type garlic precision seed-picking device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 62-68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200307&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.007. (in Chinese)
- [23] 王健,赵国生. MATLAB 数学建模与仿真 [M]. 北京:清华大学出版社,2016.
- [24] 王东伟,尚书旗,韩坤. 4HJL-2 型花生联合收获机摘果机构的设计与试验 [J]. 农业工程学报,2013,29(14):15-25. WANG Dongwei, SHANG Shuqi, HAN Kun. Design and test of picking mechanism in 4HJL-2 peanut combines [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14): 15-25. (in Chinese)