

生姜联合收获机自适应柔性夹持输送装置设计与试验

李维华^{1,2} 李伟³ 薛丽^{2,4} 王优强¹

(1. 青岛理工大学机械与汽车工程学院, 青岛 266520; 2. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100;

3. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 4. 农业农村部黄淮海现代农业装备重点实验室, 济南 250100)

摘要: 针对现有生姜联合收获机夹持输送装置作业成功率低、姜块损伤率高,以及植株在归集切割处易拥堵等问题,本文设计了一种可变间隙双层自适应柔性夹持输送装置。以安丘地区有机生姜为研究对象,通过物理特性试验测定了茎秆力学参数,并基于 Burgers 黏弹性模型构建了茎秆流变模型,拟合了不同载荷和茎秆部位的蠕变曲线,明晰了夹持力、输送损失与姜块损伤间的内在关系。运用 Design-Expert 软件对关键作业参数(浮动弹簧撑弹性系数、输送装置倾斜角、链条速度)进行试验设计与数据分析,通过响应曲面法揭示了各因素及其交互作用对输送成功率和损伤率的影响规律。结合生姜种植农艺,对装置关键部件进行了参数优化。田间验证试验结果表明:当浮动弹簧撑弹性系数为 9.08 N/mm、倾斜角为 29.95°、链条速度为 200.5 mm/s 时,装置输送成功率和姜块损伤率分别为 94.80% 和 4.9%,与回归模型预测结果高度吻合,显著提升了夹持输送的可靠性与作业质量,为生姜联合收获机关键部件设计与优化提供了理论依据和实践参考。

关键词: 生姜联合收获机; 自适应柔性夹持; 可变间隙; 夹持输送; 参数优化; Burgers 模型

中图分类号: S225.92

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)10-0122-12

OSID:



Design and Experiment of Self-adaptive Flexible Clamp Conveying Device for Ginger Harvester

LI Weihua^{1,2} LI Wei³ XUE Li^{2,4} WANG Youqiang¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China

2. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 250100, China

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

4. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment in Huang-Huai-Hai, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ji'nan 250100, China)

Abstract: Aiming to address the issues of low operational success rate, high ginger tuber damage rate, and frequent clogging at the gathering and cutting points in the clamping conveying devices of existing ginger combine harvesters, an adaptive flexible clamping conveying device was designed. Using Anqiu organic ginger as the research subject, the mechanical parameters of the ginger stems were firstly determined through physical property tests. A stem rheological model was constructed based on the Burgers viscoelastic model, and creep curves under different loads and at different stem locations were fitted, clarifying the intrinsic relationships among clamping force, conveyance loss, and ginger tuber damage. Design-Expert software was employed for experimental design and data analysis of key operational parameters (elastic coefficient of the floating spring support, inclination angle of the conveying device, chain speed). The response surface methodology was used to reveal the influence patterns of various factors and their interactions on harvesting success rate and damage rate. Combined with ginger cultivation agronomy, the key components of the device were structurally optimized. Field validation test results showed that when the elastic coefficient of the floating spring support was 9.08 N/mm, the inclination angle was 29.95°, and the chain speed was 200.5 mm/s, the device

收稿日期: 2025-12-03 修回日期: 2026-01-04

基金项目: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2024CXGC010904)和山东省农机研发制造推广应用一体化试点项目(NJYTHSD-202324)

作者简介: 李维华(1980—),男,博士生,山东省农业机械科学研究院工程师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: 258111278@qq.com

通信作者: 王优强(1970—),男,教授,博士,主要从事摩擦学与表面工程研究,E-mail: vhuahn@126.com

achieved a harvesting success rate of 94.80% and a ginger tuber damage rate of 4.9%. The optimized parameter combination was highly consistent with the regression model predictions, significantly improving the reliability and operational quality of the clamping and conveying process. The research result can provide a theoretical basis and practical reference for the design and optimization of key components in ginger combine harvesters.

Key words: ginger combine harvester; self-adaptive flexible clamping; variable gap; clamping conveying; parameter optimization; Burgers model

0 引言

生姜作为我国重要的特色经济作物,收获作业具有劳动强度大、季节性强和效率要求高等特点。传统生姜收获主要依赖人工作业,不仅耗时费力,且易造成姜块损伤,制约了生姜产业的规模化与标准化发展。目前,国内外在生姜收获机械化方面仍处于探索与完善阶段,尤其缺乏高效、低损和适应性强的联合收获技术与装备。

现有生姜收获机械主要分为挖掘式与提拉式两大类^[1-2]。挖掘式机械通过挖掘铲将姜块与土壤一同挖起,后续需进行土块分离与姜秧切割,存在土壤适应性强但分离不彻底、易伤姜块等问题;提拉式机械则通过夹持姜秧将整株提起,实现姜块与土壤分离,但对姜秧密度、整齐度及物理特性要求较高,易出现漏拔、拥堵与损伤现象。国外因生姜种植规模有限,相关机械化研究较少;国内樊士玉^[3]采用单链齿链条机构实现了茎秆的夹持与输送功能,但在夹持过程未表现出柔性适配能力,且输送成功率较低、输送损伤率较高,普遍存在成功率低、破损率高和堵塞频发等问题,严重影响了收获效率与作业质量^[4-7]。

夹持输送装置作为生姜联合收获机的核心部件,直接决定了姜秧的提拉稳定性、输送顺畅性与分离清洁度。其设计需充分考虑生姜茎秆物理特性、种植农艺及作业环境等多重要素^[8-10]。目前,针对生姜茎秆流变学特性及其在夹持过程的力学响应尚缺乏系统研究,导致装置设计多依赖经验,参数匹配不够精确,难以实现柔性、自适应作业。为此,本文以山东安丘地区典型有机生姜为研究对象,围绕姜秧夹持输送过程的关键技术难题,开展茎秆物理特性与流变行为研究,构建夹持输送装置黏弹性力学模型,揭示夹持力、输送速度、装置倾角等关键参数对作业性能的影响规律。在此基础上,设计一种可变间隙双层自适应柔性夹持输送装置^[11-14],通过结构优化与参数协同,实现“稳提拉、畅输送、净分离”作业目标。以期为生姜联合收获机研发提供理论依据与技术支撑,推动生姜生产机械化向高效、低损、智能化方向发展。

1 可变间隙双层自适应柔性夹持输送装置结构与工作原理

1.1 整体结构与工作原理

可变间隙双层自适应柔性夹持输送装置作为生姜联合收获机的核心执行部件,以“柔性夹持、分段施力、有序输送、高效分离”为设计原则,提拉收获原理是生姜等根茎类农作物普遍采用的收获原理^[15-16],旨在实现生姜植株的低损、高效、流畅收获。核心功能是替代传统刚性或单一夹持方式,通过可动态调整的间隙与双层协同的夹持输送,适应生姜茎秆个体差异与田间生长的不规则性,从而显著提高作业成功率和减少机械损伤。

装置整体结构(图 1)主要包括变频电机、夹持输送链条、浮动弹簧撑机构、抛秧装置、链条导轨及龙门支撑架等。动力传递路径为:变频电机驱动主动链轮,通过链条带动整个夹持输送系统运转;浮动弹簧撑机构为关键的压力自适应部件;抛秧装置则完成姜秧的最终分离与抛撒。

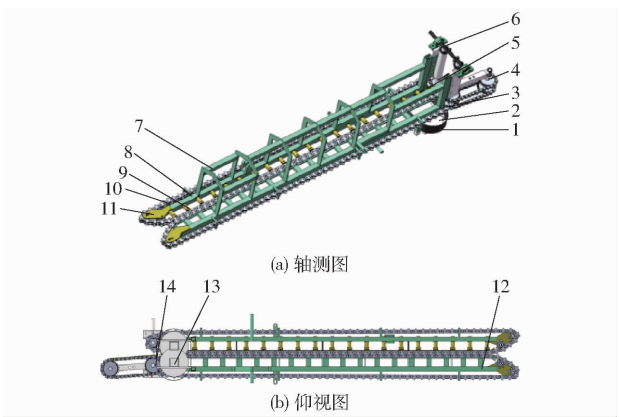


图 1 可变间隙双层自适应柔性夹持输送装置结构
Fig.1 Structural drawings of variable gap double layer flexible clamping conveying device

- 1. 切割刀保护套 2. 切割刀 3. 夹持链条张紧轮 4. 抛秧装置从动轮 5. 抛秧装置 6. 外部传递动力机构 7. 龙门架 8. 可变间隙链条导轨 9. 浮动弹簧撑 10. 链条 11. 前端链轮架板 12. 链条带孔长杆 13. 变频电机 14. 抛秧装置主动轮

工作原理为:作业时,收获机沿姜垄前进,扶禾器将倒伏杂乱的生姜植株梳理并导入装置。链条上设置的柔性夹持单元在浮动弹簧撑作用下,以适当

且可调的夹持力抱住茎秆。随着链条以一定倾角(约 30°)向上运动,植株在挖掘铲松土的配合下被整体提拉出土壤。随后,植株被稳定输送至后方的低自由度双夹持切割装置,完成姜块与姜秧切割分离。分离后的姜块落入收集装置,而姜秧则被继续输送至抛秧装置,利用差速原理被快速抛撒至田间。

1.2 可变间隙双层柔性夹持机构

可变间隙双层自适应柔性夹持装置核心创新在于其可变间隙双层柔性夹持机构(图2),由支撑架、弹簧顶杆、浮动弹簧撑和链条活动支撑杆等构成。支撑架作为整个夹持单元的安装基体,固定在链条上,随链条同步运动。浮动弹簧撑是实现“柔性”与“自适应”的关键,内部弹簧提供预设的弹性力,当夹持不同粗细茎秆时,弹簧压缩量自动变化,从而动态调整施加在茎秆上的夹持力,既能保证夹持牢靠,又能防止压力过大造成茎秆压溃或表皮损伤。链条活动支撑杆与浮动弹簧撑连接,直接接触并夹持茎秆,与链条导轨配合,实现夹持间隙在输送过程的可控变化,确保植株从喂入到分离不同阶段获得最适宜的约束。该设计使得夹持力不再是固定值,而是根据茎秆的物理特性(直径、刚度)和所处工艺阶段自适应调整,有效解决因植株差异导致的夹持过松(滑脱)或过紧(损伤)问题。

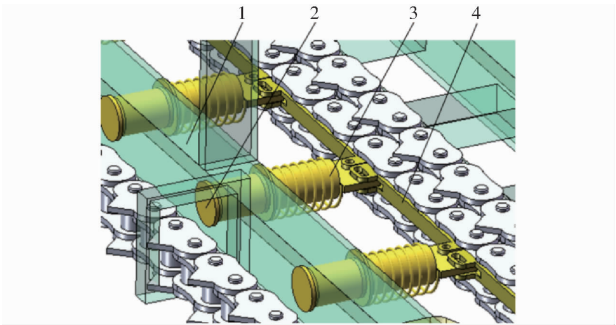


图2 柔性夹持机构

Fig.2 Mechanism of flexible gripping principle

1. 支撑架 2. 弹簧顶杆 3. 浮动弹簧撑 4. 链条活动支撑杆

1.3 可变间隙双层自适应柔性夹持装置工作过程

装置工作过程是一个连续的、分阶段的精准作业流程,可分为5个典型阶段(图3)。

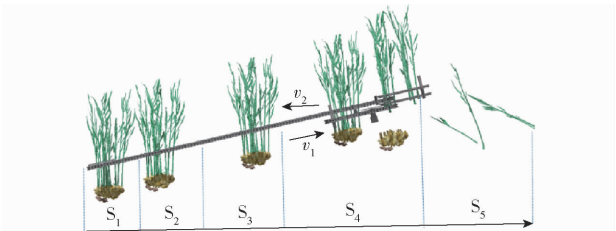


图3 夹持输送装置工作过程

Fig.3 Working process of clamping conveying device

扶禾喂入阶段 S_1 :在扶禾器作用下,田间自然

生长的生姜植株被归拢、扶正,并有序地引导至夹持装置入口。此时,夹持单元处于预备状态,间隙相对较大,便于茎秆顺利喂入。

夹持拔取阶段 S_2 :植株茎秆进入夹持区后,在链条运动与浮动弹簧撑作用下被可靠夹持。同时,前置的挖掘铲与振动铲已将姜块周围土壤松动。装置以斜向上的运动,结合适中的夹持力与提拉速度,将整株生姜从已松动的土壤中平稳拔取,此阶段关键在于克服土壤阻力,避免拉断茎秆或拔断姜须。

夹持输送阶段 S_3 :植株完全脱离土壤后,进入稳定输送阶段。双层夹持系统(上下链条协同)确保植株在倾斜上升过程姿态稳定,不会因自重或惯性发生摆动、掉落或相互缠绕。此阶段为后续切割分离提供稳定、定向的物料流。

姜秧分离阶段 S_4 :植株被输送至切割工位。此时,上下夹持链条精确控制姜块上方(切割点附近)茎秆位置。低自由度双夹持切割装置圆盘刀在双链条的稳定约束下进行切割,实现姜块与姜秧快速、干净分离,且能有效防止损伤临近姜块。

抛秧阶段 S_5 :切割后的姜秧段被上层夹持链条继续输送至装置末端的抛秧机构。利用齿轮差速原理,使抛秧辊获得更高的线速度,从而将姜秧迅速、均匀地抛撒至后方已收获区域,完成作业循环,并为后续工序清理出通道。

2 物理特性

2.1 Burgers 模型

生姜茎秆在生长过程会积累大量的纤维素和木质素。收获时期新鲜生姜茎秆同样会存在黏弹性的特性,使茎秆能在遭受一定压力后恢复原状(弹性),同时也能在一定时间内抵抗持续的形变(黏性)。Burgers^[17]模型是一个四参数的黏弹性模型,连接Maxwell模型和Kelvin-Voigt模型,以模拟生姜茎秆在不同条件下黏弹性特性,茎秆夹持Burgers流变模型如图4所示。

基于每一层输入力 $F_i(t)$ 和相应变形响应 $M_i(t)$,推导生姜茎秆整体接触力 $F(t)$ 与整体变形量 $M(t)$ 间的关系,由Burgers流变模型得到本构方程为

$$b_2 \ddot{M}(t) + b_1 \dot{M}(t) = a_2 \ddot{F}(t) + a_1 \dot{F}(t) + F(t) \quad (1)$$

其中
$$b_2 = \frac{c_2 c_1}{k_2} \quad (2)$$

$$b_1 = c_1 \quad (3)$$

$$a_1 = \frac{c_1 k_1 k_2 + k_0 (k_1 c_2 + k_1 c_1 + k_2 c_1)}{k_1 k_2 k_0} \quad (4)$$

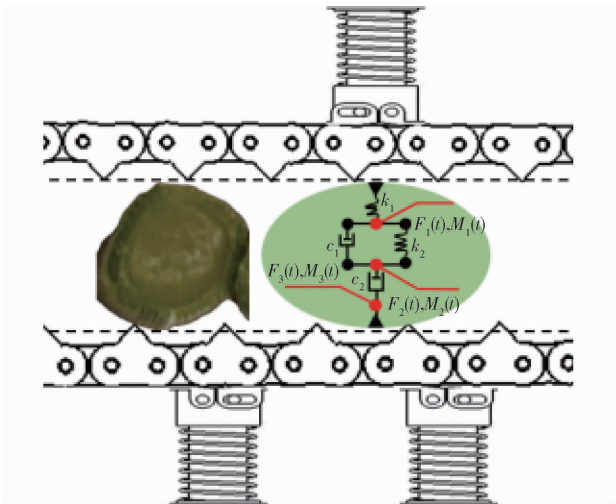


图 4 茎秆夹持 Burgers 流变模型

Fig. 4 Burgers rheological model for stem clamping

$$a_2 = \frac{c_1 c_2 (k_1 + k_0)}{k_1 k_2 k_0}$$

(5)

式中 k_1 ——瞬时弹性系数, N/mm
 k_2 ——延迟弹性系数, N/mm
 c_1 ——串联黏性系数, N·s/mm
 c_2 ——并联黏性系数, N·s/mm
 k_0 ——浮动弹簧弹性系数, N/mm

2.2 Burgers 模型物理特性参数

垄沟生长的生姜在收获时期茎秆含水率 w 对抗拉伸、抗挤压性能具有重要影响,不同含水率决定了生姜茎秆内部的黏弹性。瞬时弹性系数与延迟弹性系数二者均表征生姜茎秆抵抗弹性变形的能力。随着含水率增加,塑化加剧,茎秆刚性减弱,故 k_1 与 k_2 均呈单调下降趋势。 c_1 体现茎秆黏性流动的阻力,随含水率增加呈指数下降后趋于平缓, c_2 反映茎秆黏弹性的滞后效应,随含水率增加呈线性下降,如表 1 所示。

表 1 不同高含水率下 Burgers 模型参数拟合结果
Tab.1 Parameter fitting results of Burgers model under different high water contents

含水率	$k_1 /$	$k_2 /$	$c_1 /$	$c_2 /$
$w / \%$	$(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1})$	$(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1})$
85 ± 2	0.29	5.1	156.3	19.8
90 ± 2	0.22	4.3	142.5	17.2
95 ± 2	0.18	3.8	135.7	15.5

为避免在喂入、夹持输送以及链条与生姜茎秆作用的整个过程发生滑移,通过智能水分测定仪测定茎秆含水率并且通过 EZ-TEXT 型质构仪对茎秆黏弹物理特性进行计算模拟,并对不同含水率茎秆进行蠕变试验。生姜蠕变试验本构方程^[18-19]为

$$M(t) = F_0 \left(\frac{1}{k_1} + \frac{t}{c_1} \right) + \frac{F_0 - F_0 e^{-\frac{k_2}{c_2} t}}{k_2}$$

(6)

式中 F_0 ——蠕变压力, N
 t ——蠕变时间, s

蠕变试验^[20]可以准确获得本构方程的生姜茎秆黏弹性参数。生姜作为一种经济作物其价值主要在于根茎,目前生姜茎秆没有利用价值。为减少茎秆新鲜度(含水率)对试验结果的影响,整株生姜从地下挖掘后,立即切段进行蠕变试验。在本次试验中仅考虑生姜茎秆蠕变特性,即生姜茎秆在一定时间内的恒力作用下发生形变状态。由图 2 可知,夹持链条为刚性材质,主要由链条、支撑架、弹簧顶杆、浮动弹簧撑和链条活动支撑杆组成,忽略链条夹持对生姜茎秆表面不同程度的破坏。为得到收获时期新鲜生姜茎秆蠕变特性,采用收获期平度地区生姜,分别对距离根茎 300、400、500 mm 茎秆(第 1 组试验)和距离根茎 300 mm 茎秆(第 2 组试验)截取长度为 60 mm 茎秆进蠕变试验。采用 EZ-TEXT 型质构仪(SES,日本)进行压缩蠕变试验,选用 P50 工装压头(压头直径为 50 mm),如图 5 所示。

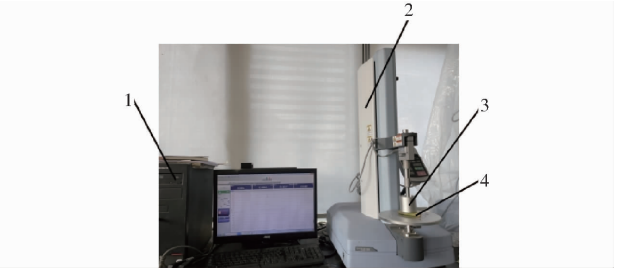


图 5 生姜茎秆蠕变试验

Fig. 5 Creep test bench for ginger stems

1. 计算机 2. EZ-TEXT 型质构仪 3. 探头 4. 生姜茎秆

试验探头加载速度均为 10 mm/min,第 1 组试验进行 3 组,每组 5 株,施加 7 N 恒定压力,在恒力持续时间 100 s 内不断记录茎秆变形量,结果如图 6 所示。第 2 组试验进行 3 组,每组 5 株,分别施加恒定压力 6、8、10 N,保持力恒定期间,记录变形量随时间的变化,结果如图 7 所示。

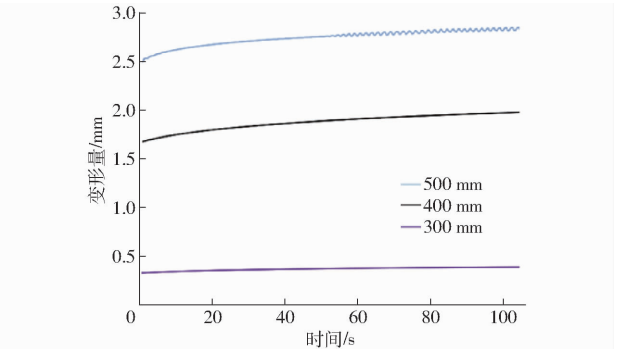


图 6 生姜茎秆不同部位在恒定加载力下变形量随时间变化曲线

Fig. 6 Deformation of different parts of ginger stems under constant load as a function of time

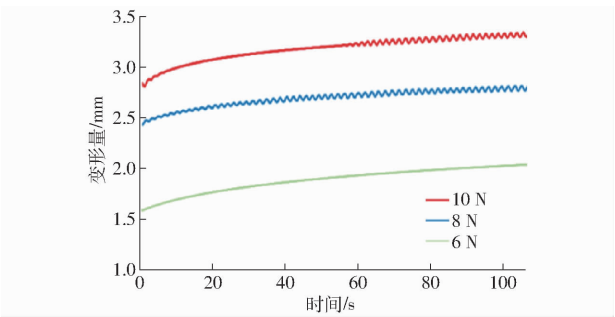


图 7 生姜茎秆相同部位在不同恒定加载力下变形量随时间变化曲线

Fig. 7 Deformation of the same parts of ginger stems under different constant loads as a function of time

在收获过程,可通过茎秆形变程度评估夹持装置的作用效果。由图 6 可知,在恒定加载力作用下,不同部位茎秆蠕变趋势基本一致:初始受压时变形显著,随着时间推移,变形量逐渐趋于稳定。差异主要体现在,越靠近根茎的茎秆部位,变形量越小。由图 7 可知,对同一茎秆部位施加不同的恒定加载力时,蠕变趋势仍保持一致,同样呈现初始变形明显、随后趋于稳定的规律。区别在于,施加载荷越大,茎秆变形量也相应增大。综合 2 组试验结果可以得出,夹持部位应尽量靠近根茎部位,由于现有农艺的要求以及收获时夹持链条的限制条件,茎秆最佳夹持部位在距离根茎 300 mm 处。利用式(6)对每组生姜茎秆蠕变试验数据进行拟合,得到黏弹性数学模型中相关系数,并计算具有相同加载力的 3 组数据平均值(表 2)。决定系数 R^2 均大于 0.995,说明构建的 Burgers 流变模型能准确代表生姜茎秆反映蠕变特性。

表 2 生姜茎秆蠕变模型拟合结果				
Tab.2 Fitting results of creep model for ginger stems				
蠕变压力 F_0/N	$k_1/$ $(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	$k_2/$ $(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	$c_1/$ $(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{mm}^{-1})$	$c_2/$ $(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{mm}^{-1})$
6	0.28	8.5	151.0	30.6
8	0.38	6.3	182.5	23.6
10	0.59	4.7	202.0	18.1
平均值	0.42	6.5	178.5	24.1

3 关键部件设计

3.1 拔禾喂入阶段

生姜整株的生长方向包括横向和纵向,实际种植时垄宽为 750 mm,沟深为 400 mm,沟宽为 200 mm。在收获过程,扶禾器首先接触生姜茎秆,通过扶禾器将生姜植株从杂乱无章的状态整理成有序排列,为后续切割作业提供便利,对提高收割效率和减少损失至关重要。

考虑以上因素,为使生姜植株能缩短到夹持点的时间,夹持点与地面距离更小,作业效果更好,扶禾器喂入张口角度设为 30° [21]。

3.2 夹持拔取受力分析

生姜整株拔取示意图如图 8 所示, F_t 为收获夹持链条对生姜整株的提拉力, N ; η 为收获拔取过程土壤对生姜整株的阻力, N ; F_x 为拔取时夹持链条对生姜茎秆的夹持力, N ; F_n 为收获拔取时挖掘铲对生姜整株支持力, N ; G 为生姜整株重力, N ; δ 为挖掘铲面倾角, $(^\circ)$ 。

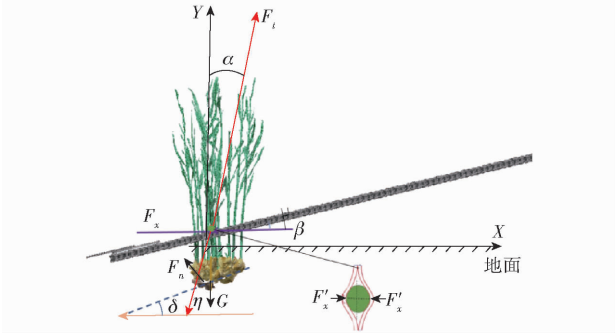


图 8 生姜整株拔取示意图

Fig. 8 Schematic of entire ginger plant extraction

为确保在收获过程夹持的生姜整株不发生打滑掉落现象,应满足

$$F_t = \mu F_x \tag{7}$$

式中 μ ——生姜整株与夹持链条间的摩擦因数
生姜整株在挖掘铲和振动筛作用下进行破土抖土后,生姜姜块以及附着在上面的泥土都会对收获过程产生一定阻力。

生姜姜块在收获过程周围的土壤会被破碎振松,依然会存在摩擦力 [22],应满足

$$\eta = \lambda \int_0^\infty 2\pi\mu_1 U(h) V(h) h dh \tag{8}$$

式中 h ——生姜姜块埋在土壤下高度, m
 μ_1 ——土壤与生姜整株的摩擦因数
 λ ——姜地土壤容重, g/cm^3
 $U(h)$ ——生姜平均半径沿竖直方向分布函数
 $V(h)$ ——生姜数目沿竖直方向分布函数

3.3 夹持输送阶段

3.3.1 茎秆运动分析

生姜整株在收获过程受到夹持输送机构的提拉力使得其与土壤分离,可变间隙双层自适应柔性夹持装置会继续输送生姜植株,生姜植株被带离地面,在双层链条作用下,生姜植株被输送到切割刀处,以便去除姜秧。在生姜植株提拉阶段,从收获机前进速度、链条输送速度和茎秆变形速度间关系,进行链条拉拔角与茎秆单元压力关系分析,如图 9 所示。

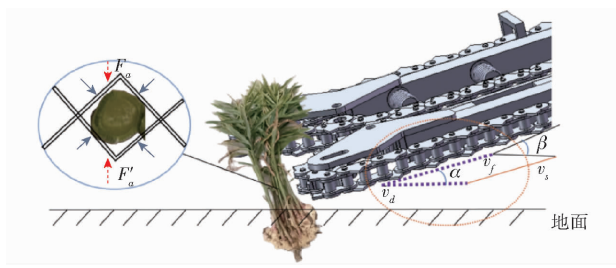


图 9 生姜植株运动与受力点分析

Fig. 9 Analysis of movement and force application points in ginger plants

在生姜植株提拉阶段,收获机收获速度 v_d 和链条夹持输送速度 v_f 关系为

$$\begin{cases} v_f \sin(\beta - \alpha) = v_d \sin \beta \\ \cos \alpha = \frac{v_f^2 + v_d^2 - v_s^2}{2v_f v_d} \end{cases} \quad (9)$$

式中 v_s ——拔取阶段生姜植株实际速度, mm/s

α ——实际拉拔角, ($^\circ$)

β ——喂入倾角, ($^\circ$)

生姜植株在收获过程,夹持输送扶秧部位刚接触生姜茎秆到夹持输送装置稳定输送,生姜茎秆受到最大力且达到最大变形量,此时生姜茎秆变形速度^[23] v_b 与夹持输送速度 v_f 关系应符合

$$k = \frac{v_f}{v_b} = \frac{l}{D} \quad (10)$$

式中 D ——茎秆变形量, mm

l ——茎秆变形过程输送距离, mm

k ——比例系数

茎秆变形主应力由浮动弹簧撑发生弹性形变造成,则茎秆单元压力 p 为

$$p = \frac{1\,000F}{bdcos\alpha - \frac{1}{2}d^2\tan\alpha} \quad (11)$$

式中 b ——茎秆夹持高度, mm

d ——茎秆直径, mm

F ——浮动弹簧撑施加给茎秆的挤压力, N

3.3.2 茎秆受力分析

在浮动弹簧撑作用下,生姜植株呈一字型向上输送,如图 10 所示。茎秆弯矩可表示为

$$E_j I_j \omega'' = F_{RA} x - F_R b_1 \quad (12)$$

式中 E_j ——茎秆弹性模量, N/mm²

ω'' ——茎秆变形挠度二阶导数, mm⁻¹

b_1 ——后段变形长度, mm

F_{RA} ——施加在茎秆上的作用力, N

I_j ——茎秆横截面对弯曲中性轴的惯性矩, mm⁴

F_R ——浮动弹簧撑对茎秆的作用力, N

将式(12)连续两次积分,得到茎秆夹持变形挠

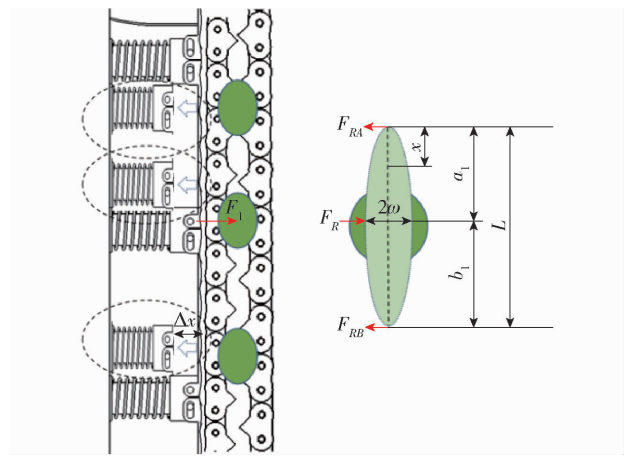


图 10 茎秆变形运动示意图

Fig. 10 Schematic of stem deformation movement

度 ω 为

$$\omega = \frac{F_{RA} x^3 - F_R (x - a_1)^3}{6E_j I_j} \quad (13)$$

式中 a_1 ——前段变形长度, mm

在浮动弹簧撑受力过程中,茎秆变形量理论上满足

$$D = D_z - \frac{F_{RA}}{k_0} \quad (14)$$

式中 D_z ——茎秆和浮动弹簧撑总变形量之和, mm
施加在茎秆上的作用力可表示为

$$F_{RA} = k_0 \Delta x \quad (15)$$

式中 Δx ——浮动弹簧撑变形量, mm

夹持输送过程,随着姜秧喂入量增大,弹簧变形量逐渐向极限变形量靠近,由式(15)可知,浮动弹簧撑施加给姜秧的作用力降低,根据收获时弹簧自身极限值以及姜秧形变保护的需要,设置浮动弹簧撑到弹簧顶杆间距为 150 ~ 200 mm。

3.4 姜秧分离阶段

姜秧分离运动示意图如图 11 所示。确保生姜整株姜块姜秧分离^[24-25] 需满足条件

$$F'_t \cos \theta + F_d \sin \theta' = G \quad (16)$$

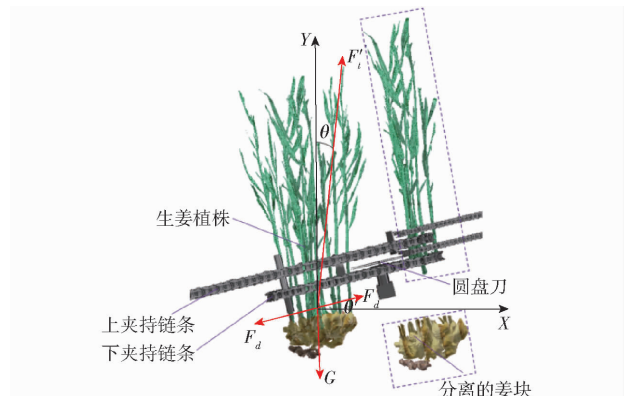


图 11 姜秧分离运动示意图

Fig. 11 Schematic of ginger seedling separation movement

$$F'_t \sin \theta = F_d \cos \theta'$$
 (17)

式中 F'_t ——双夹持链条对生姜植株的夹持力,N
 F_d ——圆盘刀对生姜茎秆的阻碍力,N
 θ ——夹持力与竖直方向夹角,(°)
 θ' ——圆盘刀与水平方向夹角,(°)

为确保植株姜块、姜秧安全分离,下夹持链条应尽可能地靠近姜块且不能接触,圆盘刀与下夹持链条距离应尽可能靠近且不能接触。根据实际情况,设计上下2个链条距离为150 mm,圆盘刀与下夹持链条距离为20 mm。

3.5 差速抛秧阶段

抛秧示意图如图12所示。

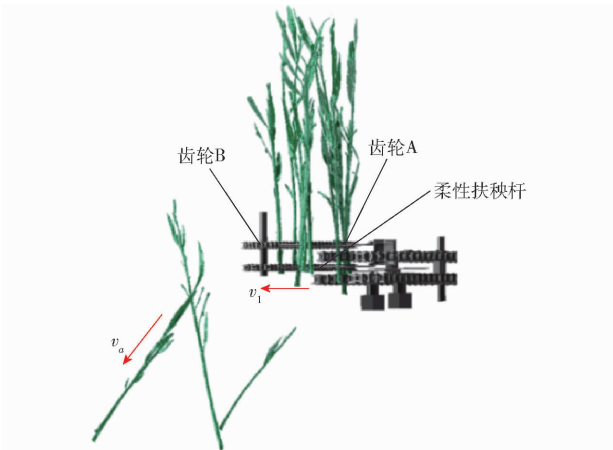


图 12 抛秧示意图

Fig. 12 Schematic of transplanting seedlings

为实现在田间快速抛秧,使用链条和扶秧杆夹持秧苗。首先,将扶秧杆固定形成稳定的支撑点。接着,利用扶秧杆柔韧性,将秧苗轻轻固定在链条上。同时,采用不同齿数齿轮实现差速抛秧,满足关系

$$\begin{cases} v_a = \pi d_a N_a \\ v_a = n_a v_1 \end{cases}$$
 (18)

式中 v_a ——抛秧齿轮 B 圆周线速度,mm/s
 n_a ——差速系数
 d_a ——抛秧齿轮 B 分度圆直径,mm
 N_a ——抛秧齿轮 B 转速,r/s

保证姜秧快速抛出,齿轮 A 齿数为 25,齿轮 B 齿数为 20,可得 n_a 为 1.2。

4 夹持装置参数设计

4.1 浮动弹簧撑弹性系数

由式(15)可求出浮动弹簧撑弹性系数,收获夹持输送过程茎秆变形量不随时间变化,始终保持为一个固定值。即生姜茎秆整体变形量 $M(t) = 0$,当 $k_0 = 3 \text{ N/mm}$ 时,代入式(1)可得

$$1\,796 \ddot{F}(t) + 516 \dot{F}(t) + F(t) = 0$$
 (19)

初始条件 $F(0) = 12.1 \text{ N}$, $F(20) = 10.8 \text{ N}$,求得夹持输送过程夹持力与时间的关系为

$$F(t) = 4.6e^{-0.0021t} + 2.2e^{-0.284t}$$
 (20)

同理可得 $k_0 = 7 \text{ N/mm}$ 与 $k_0 = 11 \text{ N/mm}$ 时对应的夹持力随时间变化关系式为

$$F(t) = 7.2e^{-0.0118t} + 1.2e^{-0.2248t}$$
 (21)

$$F(t) = 8.5e^{-0.0120t} + 2.3e^{-0.1483t}$$
 (22)

由图13可看出,当弹性系数越小时,夹持力随时间减小的速度越快,此时在夹持输送过程会发现打滑漏持现象;当弹性系数越大时,夹持力随时间减小的速度变慢,此时完全能够实现稳定夹持输送过程,但茎秆易发生穿透损伤。

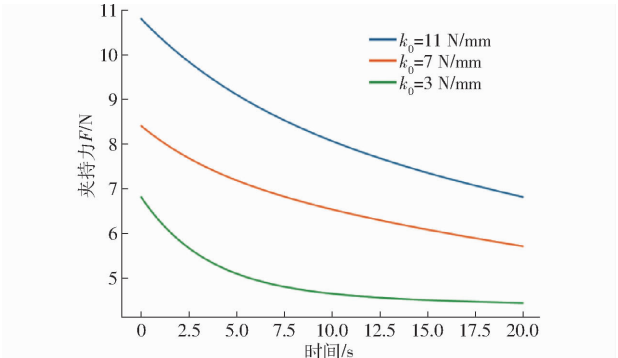


图 13 不同弹性系数下夹持力与时间变化曲线

Fig. 13 Variation curves of clamping force and time under different elastic coefficients

4.2 浮动弹簧撑寿命

浮动弹簧撑在夹持输送阶段受周期性压缩载荷作用,其循环应力范围可根据式(15)及最佳参数组合下的夹持力变化得到。取夹持力为10.8 N(图13),弹簧压缩变形量为5~8 mm,根据材料力学疲劳曲线估算

$$N_f = C(\Delta\sigma)^{-m}$$
 (23)

式中 N_f ——可承受的疲劳循环次数
 C ——浮动弹簧撑材料疲劳常数
 $\Delta\sigma$ ——循环应力幅,MPa
 m ——疲劳指数

可得浮动弹簧撑年作业强度约为 3×10^5 次循环,总体寿命可达2.0年以上(常规收获季节使用1个月/年)。说明浮动弹簧撑在正常农机工况下具有足够的疲劳寿命。

4.3 夹持输送链条速度

当链条速度为200 mm/s时,对应的夹持力随时间的变化满足 $F(t) = 7.2e^{-0.0118t} + 1.2e^{-0.2248t}$,在链条速度可调的情况下,同理可以得到速度150 mm/s和250 mm/s下对应的函数关系式为

$$F(t) = 0.9e^{-0.2248t} + 6.2e^{-0.0118t}$$

$$F(t) = 2.1e^{-0.2248t} + 8.6e^{-0.0118t}$$

根据以上关系式得到不同链条速度下夹持力与时间的关系曲线如图 14 所示。

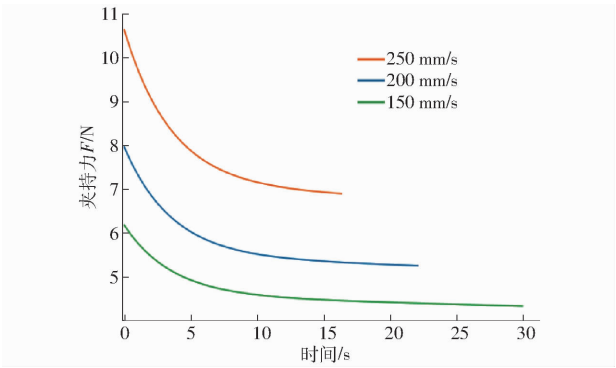


图 14 不同链条速度下夹持力与时间变化曲线
Fig. 14 Variation curves of clamping force with time at different chain speeds

4.4 链条磨损与极限寿命

链条输送装置受拖曳载荷、节距磨损与泥沙侵蚀影响,链条磨损寿命关系为

$$\frac{\Delta P}{P} = KTF'_0 \tag{24}$$

式中 ΔP ——链条节距变化量,mm
 P ——链条原始节距,mm
 K ——磨损系数
 T ——链条作业时间,s
 F'_0 ——链条平均受力,N

试验中链条张紧力稳定,当含沙土壤磨粒作用较强时磨损加剧。依据田间试验持续运行 24 h 以上未出现延伸失效,结合链传动极限伸长率 1.5% ~ 2% 判断,装置链条寿命可达 250 ~ 300 h,超过季度作业时间需求。

4.5 夹持输送装置倾斜角

收获时,夹持输送装置与水平面具有一定夹角,以保证生姜植株能够顺利拔起,称为喂入角。通过对生姜植株的运动学分析可知,植株被拔起时水平分速度须大于竖直方向分速度,又因夹持输送装置倾角范围为 $0^\circ \sim 45^\circ$,因此 $\cos\beta$ 取值范围为 $0 \sim 0.71$ 。通过上述运动学分析,需满足

$$\cos 45^\circ < \frac{1}{\cos\delta} \leq \frac{v_f}{v_d} = k \tag{25}$$

$$k = \frac{v_f}{v_d} = \frac{1}{\cos\beta - \sin\beta} > 0 \tag{26}$$

$$4k = 4 \frac{v_f}{v_d} > \frac{1}{\sin\beta} \tag{27}$$

因 $\cos\beta - \sin\beta > 0$,所以 $0^\circ < \beta < 45^\circ$,进一步求解得出当 $14^\circ < \beta < 45^\circ$ 时,满足生姜的拔起作业。

收获时,夹持输送装置倾斜角^[26]会直接影响夹持高度,进而影响输送过程是否顺畅以及后续姜秧

分离。倾斜角太大会导致夹持高度太小,导致姜块部分与后方切割刀等产生干涉,造成损伤;倾斜角太小会导致夹持高度太大,导致后续姜秧姜块分离时存在姜秧残留过长问题,影响装箱,占用体积。

5 试验与结果分析

5.1 试验方法与结果

在实际作业过程,夹持输送装置末端装有切割刀,用于分离非食用部分(如姜秧)与可食用部分(即姜块),倾斜角决定夹持高度,进而影响姜秧分离阶段是否会切到姜块,且如果夹持输送装置无法提供足够夹持力,在输送过程产生打滑下落现象会造成机具之间的干涉,造成擦伤或拥堵。

综上所述,选择链条速度 v_f 、倾斜角 β 、浮动弹簧撑弹性系数 k 作为试验因素^[27],以输送成功率 Y_1 、损伤率 Y_2 (主要通过直接观察生姜姜块是否被圆盘式割刀割伤)作为试验指标,开展三因素三水平二次旋转正交组合多因素优化试验,共计 17 组。试验因素编码如表 3 所示,试验设计方案与结果如表 4 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 3 试验因素编码			
Tab.3 Code of test factors			
编码	因素		
	浮动弹簧撑弹性系数/ (N·mm ⁻¹)	倾斜角/ (°)	链条速度/ (mm·s ⁻¹)
-1	3	25	150
0	7	30	200
1	11	35	250

表 4 试验方案与结果					
Tab.4 Experimental program and results					
试验号	因素			输送成功率	损伤率
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	0	1	1	87	15
2	0	-1	1	88	8
3	-1	1	0	85	12
4	-1	0	1	89	9
5	0	0	0	97	5
6	0	0	0	97	5
7	1	-1	0	85	8
8	1	0	-1	86	8
9	0	-1	-1	87	8
10	-1	-1	0	87	9
11	1	1	0	86	14
12	-1	0	-1	85	7
13	0	1	-1	85	14
14	0	0	0	96	4
15	1	0	1	85	9
16	0	0	0	96	4
17	0	0	0	97	4

为模拟真实田间种植情况,在试验田随机收获

一垄生姜并选择 100 颗大块生姜作为试验样本,生姜植株呈自然下垂姿态,按照田间生长方式(横式生长、竖式生长、倾斜式生长)采用手持方式依次喂入,夹持高度为姜块上端 350 mm 左右处,株距为 200 mm 左右,每组试验重复 5 次,试验结果取平均值。

由表 5 可知,输送成功率、损伤率回归模型拟合度均 $P<0.000\ 1$,模型极显著,回归模型失拟项均 $P>0.05$,失拟项不显著,输送成功率与损失率 R^2 分别为 0.994 5 和 0.991 8,表明回归模型拟合度高。去除不显著项后,回归方程为

$$Y_1=96.60-0.50X_1-0.50X_2+0.75X_3+0.75X_1X_2-1.25X_1X_3-5.68X_1^2-5.18X_2^2-4.67X_3^2$$

(28)

$$Y_2=4.40+0.25X_1+2.5X_2+0.75X_3+0.75X_1X_2+1.42X_1^2+4.92X_2^2+2.42X_3^2$$

(29)

表 5 方差分析
Tab.5 ANOVA

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	
模型	397.33	9	44.15	140.47	<0.000 1 **	
X_1	2.00	1	2.00	6.36	0.039 7 *	
X_2	2.00	1	2.00	6.36	0.039 7 *	
X_3	4.50	1	4.50	14.32	0.006 9 **	
输送成 功率	X_1X_2	2.25	1	2.25	7.16	0.031 7 *
	X_1X_3	6.25	1	6.25	19.89	0.002 9 **
	X_2X_3	0.250 0	1	0.250 0	0.795 5	0.402 1
	X_1^2	135.60	1	135.60	431.46	<0.000 1 **
	X_2^2	112.76	1	112.76	358.78	<0.000 1 **
	X_3^2	92.02	1	92.02	292.80	<0.000 1 **
	残差	2.20	7	0.314 3		
	失拟项	1.00	3	0.333 3	1.11	0.442 8
	误差	1.20	4	0.300 0		
	总和	399.53	16			
	模型	204.54	9	22.73	93.58	<0.000 1 **
	X_1	0.500 0	1	0.500 0	2.06	0.194 5
	X_2	50.00	1	50.00	205.88	<0.000 1 **
	X_3	4.5	1	4.5	18.53	0.003 5 **
	X_1X_2	2.25	1	2.25	9.26	0.018 7 *
	X_1X_3	0.250 0	1	0.250 0	1.03	0.344 1
	X_2X_3	0.250 0	1	0.250 0	1.03	0.344 1
损伤率	X_1^2	8.55	1	8.55	35.21	0.000 6 **
	X_2^2	102.13	1	102.13	420.53	<0.000 1 **
	X_3^2	24.76	1	24.76	101.96	<0.000 1 **
	残差	1.70	7	0.242 9		
	失拟项	0.500 0	3	0.166 7	0.555 6	0.671 6
	误差	1.2	4	0.300 0		
	总和	206.24	16			

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

5.2 响应曲面分析

为进一步分析因素对输送成功率以及损伤率的

影响,并确定各交互作用对 Y_1 和 Y_2 的不同影响程度,开展响应曲面分析,结果如图 15 所示。

图 15b、15e 为倾斜角固定为 30° 时,浮动弹簧撑弹性系数与链条速度的交互影响。当弹性系数一定时,输送成功率随链条速度提高先升后降,损伤率则先降后升;当链条速度一定时,输送成功率随弹性系数增大同样呈先升后降趋势,损伤率则先降后升。这是因为适当提高夹持输送速度有利于快速、稳定地夹持茎秆,但速度过高则会产生冲击,导致夹持位置不佳,进而影响收获效果。

图 15a、15d 为链条速度固定为 200 mm/s 时,浮动弹簧撑弹性系数与倾斜角的交互作用。当弹性系数一定时,输送成功率随倾斜角增大先升后降,损伤率先降后升;当倾斜角一定时,输送成功率随弹性系数增大先升后降,损伤率同样先降后升。较大倾斜角会留下较长姜秧,在输送过程中易与机具发生干涉,从而引起擦伤或淤损,降低收获质量。

图 15c、15f 为弹性系数固定为 7 N/mm 时,链条速度与倾斜角的交互影响。当速度一定时,输送成功率随倾斜角增加先升后降,损伤率先降后升;当倾斜角一定时,输送成功率随速度提高先升后降,损伤率先降后升。其原因与前述类似:适宜速度有助于优化夹持,而过高速度则因冲击效应导致夹持质量下降,最终影响作业效果。

5.3 参数优化

为获得最高输送成功率和最低损伤率,利用 Design-Expert 13 中 Optimization 模块进行试验因素优化,试验因素优化约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases}$$

(30)

经计算得最优组合:浮动弹簧撑弹性系数为 9.08 N/mm、倾斜角为 29.95° 、链条速度为 200.5 mm/s,此时输送成功率和损伤率分别为 94.80% 和 4.9%。

为验证夹持输送装置的最优工作参数组合,以安丘地区广泛种植的生姜为试验对象,以倾斜角 29.95° 、链条速度 200.5 mm/s、浮动弹簧撑弹性系数 9.08 N/mm 进行田间试验,如图 16 所示。试验结果平均输送成功率为 94.80%,损伤率为 4.9%,满足生姜收获夹持输送装置设计要求。

6 结论

(1) 针对传统生姜收获机存在的输送成功率

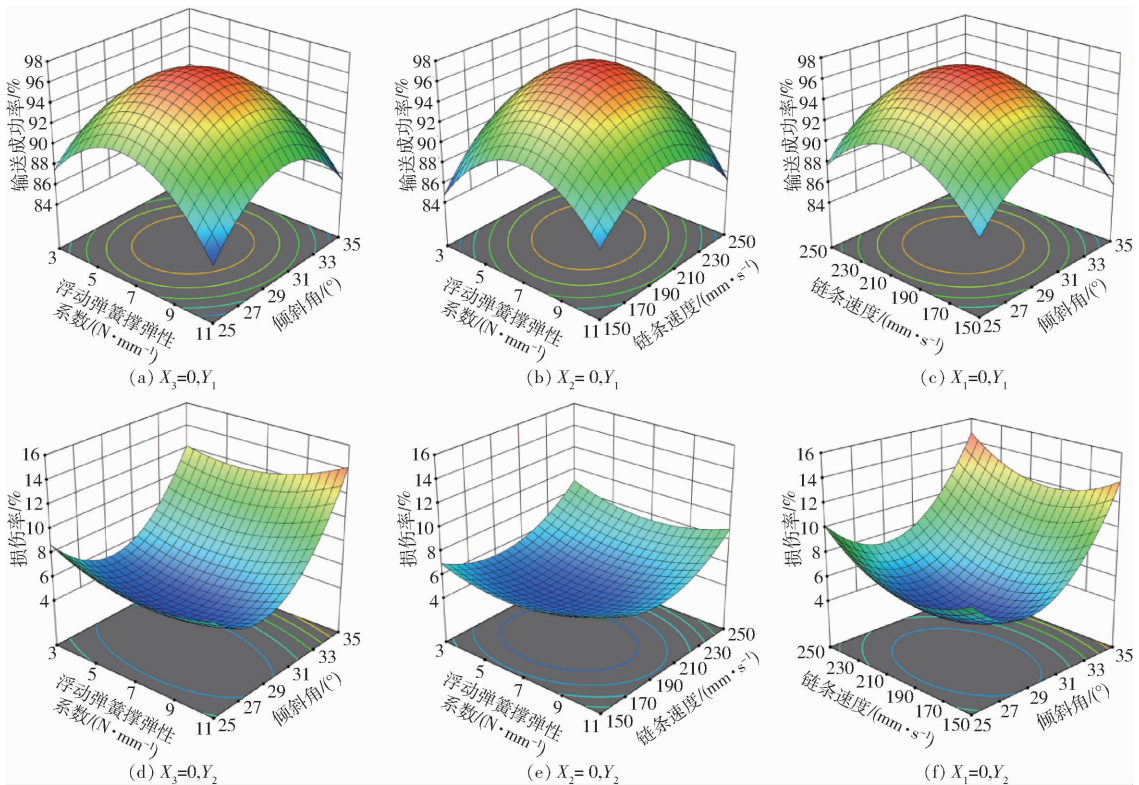


图 15 试验因素两两交互对指标影响
Fig. 15 Interaction of two factors on index



图 16 田间试验
Fig. 16 Field trial

低、破损率高、切割归集处拥堵等问题,提出一种可变间隙双层自适应柔性夹持输送装置。该装置采用分阶段柔性夹持与自适应张力调控设计,有效实现了“稳提拉、快分离、低损伤”的连续作业目标。通过关键结构参数理论分析与优化,显著提升了输送成功率,并显著降低了姜块机械损伤率。

(2)开展了生姜茎秆物理特性研究,基于蠕变试验数据构建了表征茎秆黏弹性行为的 Burgers 流变模型。通过拟合不同载荷与不同茎秆部位的蠕变曲线,获取了关键黏弹性参数(k_1 、 k_2 、 c_1 、 c_2),明确了夹持力、夹持位置(高度)、链条速度等关键作业参数与茎秆变形、夹持稳定性及损伤机理间的内在关

系,为装置参数化设计与自适应控制提供了理论依据。

(3)基于 Box - Behnken 设计方法,以浮动弹簧撑弹性系数、输送装置倾斜角、链条速度为试验因素,以输送成功率和姜块损伤率为评价指标,进行三因素三水平响应面优化试验。通过方差分析与回归模型拟合,揭示了各因素及其交互作用对作业性能的影响规律,并建立了性能指标与关键参数的数学预测模型。通过多目标优化求解,得到了最佳参数组合:浮动弹簧撑弹性系数为 9.08 N/mm、倾斜角为 29.95°、链条速度为 200.5 mm/s。

(4)田间验证试验结果表明,在优化参数组合下,该自适应柔性夹持输送装置平均输送成功率达 94.80%,姜块损伤率为 4.9%。试验结果与回归模型预测值高度吻合,证明了优化模型的有效性与可靠性。该装置能够适应生姜种植农艺要求,作业流畅、分离干净、损伤率低,为解决生姜联合收获“无机可用、有机不好用”的产业难题提供了有效技术方案和理论参考。

参 考 文 献

[1] 王宁, 李维华, 焦伟, 等. 我国生姜全程机械化技术装备研究现状及发展趋势[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(5): 47 - 51, 74.
WANG Ning, LI Weihua, JIAO Wei, et al. Design and experimental research on the clamping and pulling type ginger harvesting experimental platform[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2023, 61(5): 47 - 51, 74. (in

- Chinese)
- [2] HU S Y, HU M J, ZHANG W Y. Design and experiment of flexible clamping device for pepper plug seedlings [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2022, 14(6): 168781322211072.
- [3] 樊士玉. 夹拔式生姜收获实验平台设计与实验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2024.
FAN Shiyu. Design and experimental research of clamp pull ginger harvesting experimental platform [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024. (in Chinese)
- [4] 辛尚龙, 赵武云, 石林榕, 等. 立辊式玉米收获割台夹持输送装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(9): 34–43.
XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Design and experiments of the clamping and conveying device for the vertical roller type corn harvesting header [J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(9): 34–43. (in Chinese)
- [5] 李海同, 江涛, 关卓怀, 等. 对行式油菜薹有序收获机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(11): 92–101.
LI Haitong, JIANG Tao, GUAN Zhuohuai, et al. Design and experiment of row-following rapeseed stalk orderly harvester [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(11): 92–101. (in Chinese)
- [6] 谢建华, 吴仕花, 曹肆林, 等. 夹持辊式棉秆拔取装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(5): 101–111.
XIE Jianhua, WU Shihua, CAO Silin, et al. Design and test of clamping-roller cotton stalk pulling device [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(5): 101–111. (in Chinese)
- [7] 侯加林, 张二鹏, 张康博, 等. 基于 DEM – MFBD 的辣椒移栽机取投苗装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(12): 46–57.
HOU Jialin, ZHANG Erpeng, ZHANG Kangbo, et al. Optimization design and test of seedling picking and throwing device of plug seeding transplanter based on DEM – MFBD [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(12): 46–57. (in Chinese)
- [8] 张鹏程, 贾松涛, 王方艳, 等. 生姜植株提拉力学特性的试验研究[J]. *中国农机化学报*, 2024, 45(1): 117–121.
ZHANG Pengcheng, JIA Songtao, WANG Fangyan, et al. Experimental study on the mechanical properties of ginger plants in pulling [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 45(1): 117–121. (in Chinese)
- [9] 李西振, 杨然兵, 李建东, 等. 生姜力学性能试验与分析[J]. *农机化研究*, 2008, 30(4): 155–157, 170.
LI Xizhen, YANG Ranbing, LI Jiandong, et al. Experimental study and analysis of the mechanical properties of ginger [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2008, 30(4): 155–157, 170. (in Chinese)
- [10] 侯加林, 方立志, 李玉华, 等. 基于电容检测技术的蒜种鳞芽扶正装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(4): 63–72.
HOU Jialin, FANG Lizhi, LI Yuhua, et al. Design and test of garlic clove orientation device based on capacitive detection technology [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(4): 63–72. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 余瑞明, 廖宇兰, 刘世豪. 木薯收获机夹持输送机构设计与力学分析[J]. *农机化研究*, 2015, 37(8): 74–80.
YU Ruiming, LIAO Yulan, LIU Shihao. Design and mechanical analysis of the clamping conveying mechanism for a cassava harvester [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015, 37(8): 74–80. (in Chinese)
- [13] 杨然兵, 尚书旗. 花生联合收获机柔性夹持装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(8): 67–71.
YANG Ranbing, SHANG Shuqi. Design and test analysis of peanut combine flexible clamping device [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(8): 67–71. (in Chinese)
- [14] 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 conveyor 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)
- [15] 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)
- [16] 侯加林, 刘鲁鹏, 赵桂洋, 等. 基于 EDEM – MFBD 的大蒜变刚度柔性夹持输送装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(6): 362–373.
HOU Jialin, LIU Lupeng, ZHAO Guiyang, et al. Optimization and test of garlic variable stiffness flexible clamping conveyor device based on EDEM – MFBD [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(6): 362–373. (in Chinese)
- [17] ZOU L, YUAN J, LIU X, et al. Burges viscoelastic model-based variable stiffness design of compliant clamping mechanism for leafy greens harvesting [J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 208: 1–15.
- [18] 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.
- [19] 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.

[20] 马瑞峻,萧金庆,郑普峰,等.穴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)

[21] 李光乐,覃艳雅,张喜瑞.玉米联合收获机夹持输送喂入装置的优化试验[J].江苏农业科学,2011,39(5):511–512.

[22] 侯加林,李超,娄伟,等.大蒜联合收获机浮动式夹持装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(1):137–145.
HOU Jialin,LI Chao,LOU Wei,et al. Design and test of floating clamping device for garlic combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(1):137–145. (in Chinese)

[23] 刘佳军,燕海朋,田羽,等.半喂入花生联合收获夹持输送装置的设计与研究[J].中国农机装备,2023(11):21–26.
LIU Jiajun,YAN Haipeng,TIAN Yu,et al. Design and research of the clamping conveying device for semi-feed peanut combine harvester[J]. China Agricultural Machinery Equipment,2023(11):21–26. (in Chinese)

[24] 侯加林,李超,娄伟,等.大蒜联合收获机按压式切根装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(10):167–174.
HOU Jialin,LI Chao,LOU Wei,et al. Operation mechanism analysis and test of press root cutting device for garlic combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(10):167–174. (in Chinese)

[25] 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)

[26] 廖宜涛,李运通,万星宇,等.龙门式电驱动油菜薹收获机设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(12):147–159.
LIAO Yitao,LI Yuntong,WAN Xingyu,et al. Design and experiment of gantry type electric drive rapeseed stalks harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(12):147–159. (in Chinese)

[27] 辛杰,侯加林,李玉华.大蒜联合收获机夹持输送机构的设计与分析[J].农机化研究,2019,41(4):75–79.
XIN Jie,HOU Jialin,LI Yuhua. Design and analysis of the clamping conveying mechanism for a garlic combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2019,41(4):75–79. (in Chinese)

(上接第 43 页)

[20] 窦玉宽.秸秆纤维地膜栽培烤烟垄上覆膜机研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2021.
DOU Yukuan. Research on tobacco mulching machine on the ridge based on straw fiber film [D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2021. (in Chinese)

[21] 麻芳兰,苗金泽,樊广坤,等.丘陵地区甘蔗种植机仿形覆土器设计与试验[J].农业工程学报,2025,41(2):26–36.
MA Fanglan,MIAO Jinze,FAN Guangkun,et al. Design and test of a contour-following soil cover device for sugarcane planters in hilly areas[J]. Transactions of the CSAE,2025,41(2):26–36. (in Chinese)

[22] 宋强龙.单行起垄施肥作业机镇压装置设计与试验[D].郑州:河南农业大学,2024.
SONG Qianglong. Design and experiment of compaction device for single-row ridging fertilizer machine [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,2024. (in Chinese)

[23] 廖庆喜,裴立民,张青松,等.油菜铺膜打孔播种机滚动式割膜打孔装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(9):85–98.
LIAO Qingxi,PEI Limin,ZHANG Qingsong,et al. Design and experiment of rolling film cutting and hole punching device for rapeseed seeder with film mulching and perforating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(9):85–98. (in Chinese)

[24] 戴飞,宋学锋,赵武云,等.全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J].农业机械学报,2019,50(2):49–56,77.
DAI Fei,SONG Xuefeng,ZHAO Wuyun,et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(2):49–56,77. (in Chinese)

[25] 廖庆喜,王迪,姚露,等.油菜覆膜打孔穴播机打孔装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(8):62–72.
LIAO Qingxi,WANG Di,YAO Lu,et al. Design and experiment of membrane punch device for rapeseed film perforating and precision dibbling-planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):62–72. (in Chinese)

[26] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国科学技术出版社,2007.

[27] 中华人民共和国农业农村部.铺膜机作业质量:NY/T 986—2006[S].北京:中国农业出版社,2006.

[28] 徐晓赞.穴播覆土一体化装置设计与研究[D].石河子:石河子大学,2024.
XU Xiaoyun. Design and research of integrated device for hole sowing and soil covering [D]. Shihezi: Shihezi University,2024. (in Chinese)