doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.034

基于 EDEM - MFBD 的大蒜变刚度柔性夹持输送装置设计与试验

侯加林[1]　刘鲁鹏[1]　赵桂洋[1]　李玉华[1]　辛　丽[2]　侯　瑞[3]

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省玛丽亚农业机械股份有限公司, 济宁 272000;
3. 北京邮电大学人工智能学院, 北京 100876)

摘要: 针对大蒜联合收获机在大蒜植株夹持输送过程中常出现的输送成功率低、漏持率和断茎率高、可靠性差等问题,设计了一种大蒜变刚度柔性夹持输送装置。阐述和分析了夹持输送装置的整体结构和工作原理,以不同收获期(成熟前期、中期、后期)的兰陵四六瓣、金乡杂交蒜、金杞早熟蒜品种作为研究对象,开展不同含水率下大蒜茎秆的物理特性试验,通过理论计算和力学分析,对关键部件进行了优化设计;分析夹持输送的工作过程,确定了影响其作业性能的关键因素,建立夹持输送装置 EDEM - MFBD 耦合仿真模型并进行仿真试验,探究了夹持输送装置不同作业参数对大蒜茎秆受力的影响。以夹持输送速度与前进速度速比、喂入角和浮动轮弹性系数为试验因素,以输送成功率、漏持率和断茎率为试验指标,进行二次回归正交旋转组合试验,建立各试验指标与试验因素的回归模型,并确定了夹持输送装置的最优作业参数。试验结果表明,当夹持输送速度与前进速度速比为 2.31、喂入角为 6.2°、浮动轮弹性系数为 3.95 N/mm 时,工作性能最佳,此时输送成功率为 97.21%,漏持率为 1.06%,断茎率为 1.73%。为验证优化后的夹持输送装置作业性能,进行台架试验,试验结果与回归模型预测的结果基本一致。

关键词: 大蒜联合收获机; 变刚度柔性夹持; 夹持输送装置; 双联带; EDEM - MFBD

中图分类号: S225.92　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)06-0362-12　　**OSID**:

Optimization and Test of Garlic Variable Stiffness Flexible Clamping Conveyor Device Based on EDEM - MFBD

HOU Jialin[1]　LIU Lupeng[1]　ZHAO Guiyang[1]　LI Yuhua[1]　XIN Li[2]　HOU Rui[3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
2. *Shandong Maria Machinery Co., Ltd.*, *Jining* 272000, *China*
3. *School of Artificial Intelligence*, *Beijing University of Posts and Telecommunications*, *Beijing* 100876, *China*)

Abstract: Aiming to address the common issues of low conveying success rate, high miss holding rate, high stem breakage rate, and poor reliability in the process of clamping and conveying garlic plants by garlic combine harvesters, a kind of variable stiffness flexible clamping conveying device for garlic was designed. The overall structure and working principle of the clamping conveying device were elaborated and analyzed. Taking different harvest periods (early stage, middle stage, late stage) of Lanling 46 cloves garlic, Jinxiang hybrid garlic, and Jinqi early maturing garlic varieties as research objects, physical property tests of garlic stems under different moisture contents were carried out. Through theoretical calculation and mechanical analysis, key components were optimized; the working process of clamping conveying was analyzed to determine the key factors affecting its performance. An EDEM - MFBD coupling simulation model of the clamping conveying device was established and simulated to explore the influence of different operating parameters on the stress of garlic stems. Taking the speed ratio of clamping conveying speed to forward speed, feeding angle, and elastic coefficient of floating wheel as test factors, and the conveying success rate, miss holding rate, and stem breakage rate as test indexes, a

收稿日期: 2024-03-14　修回日期: 2024-05-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2001204)、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)和山东省重点研发计划(科技股权投资)项目(2024BTJH012)

作者简介: 侯加林(1963—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: jlhou@sdau.edu.cn

通信作者: 侯瑞(1990—),女,副教授,博士,主要从事人工智能研究,E-mail: rui.hou@bupt.edu.cn

quadratic regression orthogonal rotation combination test was conducted. Regression models of each test index with test factors were established, and the optimal operating parameters of the clamping conveying device were determined. The test results showed that when the speed ratio of clamping conveying to forward speed was 2.31, the feeding angle was 6.2°, and the elastic coefficient of the floating wheel was 3.95 N/mm, the working performance was the best. At this time, the conveying success rate was 97.21%, the miss holding rate was 1.06%, and the stem breakage rate was 1.73%. In order to verify the working performance of the optimized clamping conveying device, a bench test was carried out, and the test results were basically consistent with the predicted results of the regression model.

Key words: garlic combine harvester; variable stiffness flexible clamping; clamping conveyor device; couplet belt; EDEM－MFBD

0　引言

大蒜收获是劳动密集型产业，目前我国主要是人工收获[1-4]。随着我国劳动力减少，研发推广自走式大蒜联合收获机对我国大蒜全程机械化生产具有重要意义[5-6]。目前国内研制的手扶式大蒜联合收获机[7-8]和自走式大蒜联合收获机[9-10]已基本实现大蒜联合收获，但存在漏持、断茎和可靠性差等问题；国外研制的自走式大蒜联合收获机技术相对成熟，由于种植农艺与国内不同，对我国大蒜收获参考意义不大[11]。

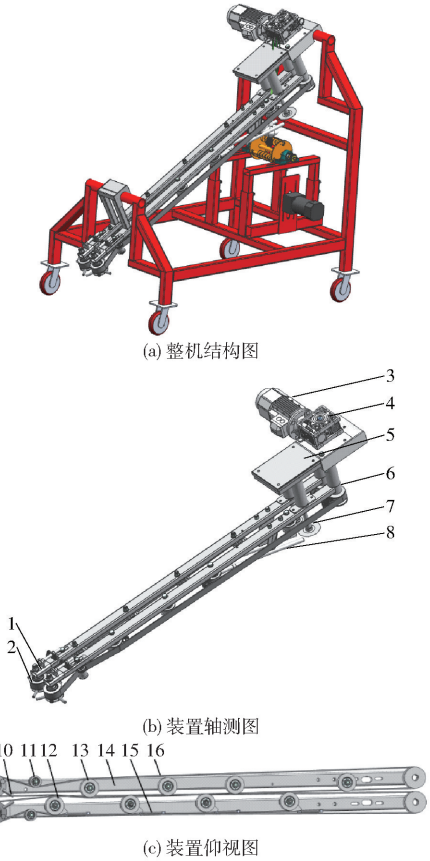
变刚度柔性夹持输送装置主要机理是实现茎秆的变刚度柔性夹持，满足“大夹持力-小变形”的作业要求。侯加林等[12]设计了一种链条交错浮动式夹持装置，实现了大蒜植株柔性夹持。邹亮亮等[13]设计了一种基于流变特性分析的菠菜有序收获夹持输送装置，揭示菠菜的损伤机理，实现了低损伤收获。辛尚龙等[14]设计了一种夹持输送间隙随玉米植株茎秆粗细自适应调节的夹持输送装置，实现了玉米植株的单株有序喂入和在立辊式割台上的有效夹持输送。收获机械受季节性影响，研发周期较长，采用 EDEM－MFBD 耦合仿真技术可增加装置的可靠性、缩短设计和研制周期，该技术已在辣椒移栽机[15]和大蒜播种机[16]研发中广泛应用。

为解决大蒜倒伏严重难喂入引起的漏持率高，夹持输送过程堵塞、断茎引起的输送成功率低和断茎率高等问题，本文提出一种大蒜变刚度柔性夹持输送装置，通过理论计算、仿真模拟与试验，对关键部件进行分析与优化，以降低漏持率和断茎率，提高输送成功率和可靠性。

1　变刚度柔性夹持输送装置结构与工作原理

1.1　变刚度柔性夹持输送装置结构

变刚度柔性夹持输送装置是自走式大蒜联合收获机的核心工作模块[17]，主要由减速电机、主动轮、拨禾轮、从动轮、张紧机构、双联带、压带轮、浮动轮、固定轮、柔性按压导轨、切茎机构和夹持主体架等组成，其整机与装置结构如图 1 所示。



(a) 整机结构图

(b) 装置轴测图

(c) 装置仰视图

图 1　整机与装置结构示意图

Fig. 1　Schematics of whole machine and device

1. 张紧机构　2. 从动轮　3. 减速电机　4. 减速器　5. 齿轮箱　6. 主动轮　7. 切茎机构　8. 柔性按压导轨　9. 拨禾轮　10. 拨指　11. 压带轮　12. 浮动轮　13. 固定轮　14. 夹持主体架　15. 张紧拉簧　16. 双联带

1.2　变刚度柔性夹持输送装置工作原理

变刚度柔性夹持输送装置工作时，主要包括拨禾喂入、夹持拔取、夹持输送、定位切根切茎和抛秧 5 个阶段，如图 2 所示。v_1方向为夹持输送装置的运动方向，v_2方向为大蒜植株的运动方向。

拨禾喂入阶段，夹持输送装置按规定的前进速度向前行驶，大蒜茎秆在对行装置引导下，受到前端拨禾轮的作用，将蒜秧拨动扶起并单株连续有序地

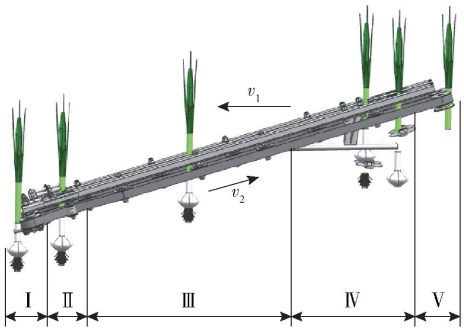


图 2 夹持输送装置工作阶段示意图

Fig. 2 Schematic of working stages of clamping conveying device

Ⅰ. 拨禾喂入阶段 Ⅱ. 夹持拔取阶段 Ⅲ. 夹持输送阶段
Ⅳ. 定位切根切茎阶段 Ⅴ. 抛秧阶段

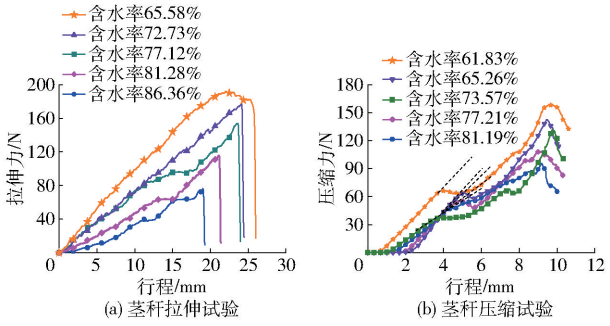
喂入到变刚度柔性夹持输送装置的入口;夹持拔取阶段,茎秆进入喂入口后与双联带接触摩擦,此时,大蒜植株刚刚被振动挖掘铲挖掘松动,双联带夹持茎秆向斜上方输送并把大蒜从松动的土壤中拔取出来;夹持输送阶段,大蒜植株从土壤中被拔取后有序输送到蒜头自适应定位环节;定位切根切茎阶段,大蒜在柔性按压导轨的作用下,大蒜下端自适应对齐后完成切根,然后进行切茎,蒜头落入输送装置;抛秧阶段,切茎后的蒜秧被继续输送到夹持输送的末端,抛秧装置利用速度差分原理,实现大蒜蒜秧的快速抛离。在整个工作过程中,浮动轮通过张紧弹簧提供浮动夹持力,实现不同直径大蒜植株茎秆的变刚度柔性夹持。

2 物理特性分析

大蒜茎秆含水率对其机械性能(拉断力、挤压强度)有重要的影响,在收获过程中,掌握不同含水率下茎秆的拉伸和压缩变化规律,减少茎秆夹断损失,明晰茎秆和双联带之间的相互作用具有参考意义。因此本文利用常温静载试验方法[18],分别收集 100 株不同收获期(成熟前期、中期、后期)的兰陵四六瓣、金乡杂交蒜、金杞早熟蒜作为研究对象,通过 EZ-TEXT 质构仪和智能水分测定仪等设备对大蒜植株关键部位的相关物理特性进行测量与分析。

拉伸力和夹持力是影响茎秆断裂的重要因素[19],为确定夹持输送 5 个阶段受力的合理范围,对茎秆进行拉伸和压缩试验,试验曲线如图 3 所示。

由图 3a 可知,不同含水率的大蒜茎秆所对应的拉伸力变化趋势相似:初始拉拔行程内,拉拔力的上升速度较明显,平稳增加,到达拐点(茎秆断裂)之后拉拔力迅速下降。区别在于当含水率较小时,茎秆纤维之间的结合力增强,大蒜茎秆的断裂极限值增加,茎秆拉伸断裂极限值为 67.78 ~ 179.29 N。



(a) 茎秆拉伸试验 (b) 茎秆压缩试验

图 3 物理特性试验曲线

Fig. 3 Physical characteristics test curves

由图 3b 可知,初始阶段压缩力变化比较缓慢,之后随行程增大压缩力近似为线性增加,到达第一峰值点后,压缩力增幅随行程的增加不再保持线性,压缩力开始减小。茎秆在第 1 阶段属于线弹性变形阶段,k_1、k_2、k_3、k_4、k_5分别为第 1 阶段茎秆压缩载荷行程特性曲线的斜率,可视作弹性模量 E;第一峰值点之后茎秆的变形为永久性不可恢复,压缩力随着行程的增大先减小后增大,到达第二峰值点后,茎秆开始破裂,压缩力减小。茎秆的最大压缩破裂极限随着茎秆含水率的增大而减小,茎秆压缩断裂极限值为 88.36 ~ 167.58 N。

3 关键部件设计

3.1 拨禾喂入阶段分析

拨禾轮是实现大蒜茎秆有序扶起、单株喂入的关键性部件[20],拨禾原理如图 4 所示。

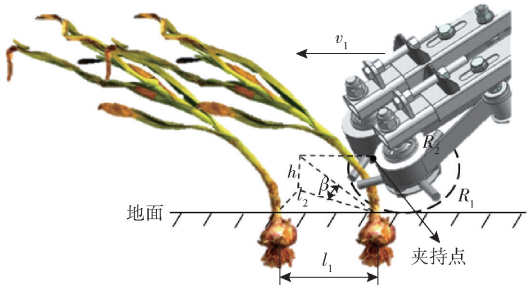


图 4 大蒜单株连续有序喂入拨禾原理图

Fig. 4 Garlic single-plant continuous orderly feeding crop divider schematic

为最大限度地提高拨禾扶起喂入的作业效果,拨禾轮的圆周半径 R_1和转速 N_1应满足

$$\begin{cases} \dfrac{l_1}{v_1} \geqslant \dfrac{2\pi}{3}\dfrac{120}{2\pi N_1} \\ \beta = \arctan\dfrac{h_0}{\sqrt{l_1^2 + l_2^2}} \\ N_1 = \dfrac{v_2}{2\pi R_2} \\ \dfrac{2\pi N_1 R_1}{3v_1} \end{cases} \tag{1}$$

式中　l_1——大蒜株距，mm

l_2——大蒜茎秆在夹持点处的最大横向偏移，mm

R_2——从动轮半径，mm

v_1——收获机前进速度，mm/s

v_2——双联带输送速度，mm/s

h_0——夹持点高度，mm

β——割台倾斜角度，(°)

经计算拨禾轮的圆周半径 R_1 取值范围为 80 ~ 120 mm，转速 N_1 取值范围为 2.57 ~ 3.17 r/s。

3.2　夹持拔取阶段分析

夹持拔取阶段对大蒜收获的质量影响较大，对大蒜夹拔取送阶段进行受力和运动学分析，v_{jd} 代表双联带绝对速度的方向，如图 5 所示。

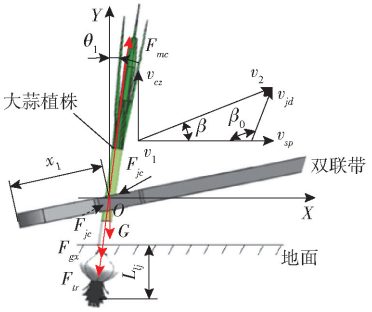


图 5　大蒜夹持拔取受力和运动分析

Fig. 5　Garlic clamping and extraction force and motion analysis

根据图 5 受力分析，大蒜夹持拔取时满足

$$F_{mc} = F_{tr} + F_{gx} + G\cos\theta_1 = \mu_{dc} F_{jc} \tag{2}$$

式中　F_{mc}——夹持拔取时双联带与茎秆间的摩擦力，N

F_{tr}——大蒜夹持拔取时土壤对大蒜阻力，N

F_{gx}——大蒜夹持拔取惯性力，N

F_{jc}——大蒜夹持拔取时双联带对大蒜的夹持力，N

G——大蒜重力，N

θ_1——大蒜倾角，(°)

μ_{dc}——大蒜茎秆与双联带间的摩擦因数

根据微积分原理和相关理论研究，大蒜夹持拔取时土壤对大蒜鳞茎的阻力计算公式为

$$F_{tr} = \int_0^{L_{lj}} 2\pi r K \mu_{tc} \gamma h \mathrm{d}h \tag{3}$$

式中　r——大蒜鳞茎半径，mm

K——土壤压力系数

μ_{tc}——大蒜鳞茎与土壤间的静摩擦因数

γ——大蒜土壤容重

h——鳞茎底部沿拔取方向与地面的距离，mm

L_{lj}——大蒜与土壤接触长度，mm

大蒜夹持拔取惯性力计算公式为

$$F_{gx} = \frac{m v_2^2}{2x_1} \tag{4}$$

式中　m——大蒜植株质量，kg

x_1——大蒜茎秆沿夹持输送方向的位移，mm

根据式(2) ~ (4)可得

$$\begin{cases} F_{mc} = \displaystyle\int_0^{L_{lj}} 2\pi r K \mu_{tc} \gamma h \mathrm{d}h + G\cos\theta_1 + m\frac{v_2^2}{2x_1} \\ F_{jc} = \dfrac{\displaystyle\int_0^{L_{lj}} 2\pi r K \mu_{tc} \gamma h \mathrm{d}h + G\cos\theta_1 + m\frac{v_2^2}{2x_1}}{\mu_{dc}} \end{cases} \tag{5}$$

大蒜植株在夹持拔取时运动几何关系满足

$$\begin{cases} \dfrac{v_2}{\sin\beta_0} = \dfrac{v_1}{\sin(180° - \beta_0 - \beta)} \\ \beta_0 = 90° + \theta_1 \\ F_{mc}\cos\theta_1 = \dfrac{m v_{cz}^2}{2L_{lj}} \\ v_{cz}^2 + v_{sp}^2 = v_2^2 \end{cases} \tag{6}$$

由式(6)可得

$$\begin{cases} \dfrac{v_2}{v_1} = \dfrac{\cos\theta_1}{\cos(\beta + \theta_1)} \\ v_{cz} = \sqrt{\dfrac{2L_{lj}F_{mc}\cos\theta_1}{m}} \end{cases} \tag{7}$$

式中　β_0——双联带绝对速度和前进速度的夹角，(°)

v_{cz}——大蒜植株垂直分速度，mm/s

v_{sp}——大蒜植株水平分速度，mm/s

根据第 2 节测算的茎秆拉伸断裂极限和茎秆压缩断裂极限的数据，求得土壤压力系数 K 近似在 0.36 ~ 0.52。通过式(7)可知夹持输送速度与前进速度速比 i 为 1.8 ~ 3.2，且大蒜植株的垂直分速度 v_{cz} 为 300 ~ 900 mm/s 时，大蒜植株拔取效果较好。

3.3　夹持输送阶段分析

在夹持输送过程中，大蒜植株被拨禾轮拨送到喂入口，从大蒜茎秆刚被双联带挤压到大蒜茎秆挤压变形至最大这个阶段，变形关系如图 6 所示。

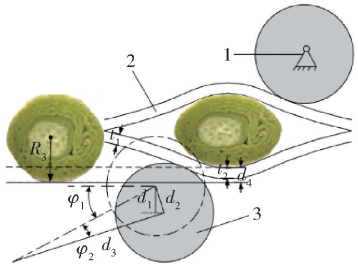


图 6　变形过程分析

Fig. 6　Analysis of deformation process

1. 双联带　2. 固定轮　3. 浮动轮

主要存在大蒜茎秆变形、双联带变形和浮动轮浮动,近似存在几何关系

$$\cos\varphi_1 = \frac{d_1}{d_3\varphi_2} \tag{8}$$

式中 φ_1——浮动轮支架与夹持主体的夹角,rad

φ_2——浮动轮浮动角,rad

d_1——浮动轮浮动量,mm

d_3——浮动轮支架长度,mm

为实现“大夹持力-小变形”的作业要求,大蒜茎秆变形量需满足关系

$$\begin{cases} \Delta d = 2R_3 - d_1 - 2\Delta t \\ k_0 = \dfrac{2F_f}{d_2} \\ \Delta t = t_1 - t_2 \end{cases} \tag{9}$$

式中 Δd——大蒜茎秆变形量,mm

R_3——大蒜茎秆夹持部位半径,mm

Δt——双联带变形量,mm

t_1——双联带初始厚度,mm

t_2——双联带夹持输送时厚度,mm

k_0——浮动轮弹性系数,N/mm

F_f——浮动轮受到的大蒜茎秆反作用力,N

d_2——浮动轮拉簧拉伸量,mm

对大蒜夹持输送过程进行受力分析,如图 7 所示。

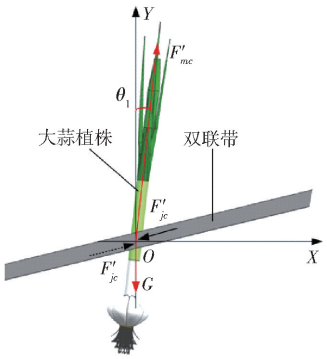


图 7 大蒜夹持输送受力分析

Fig. 7 Garlic clamping and conveyor force analysis

要保证大蒜植株顺利夹持输送不掉落,夹持力需要满足

$$\begin{cases} F'_{mc} = G\cos\theta_1 = \mu_{dc}F'_{jc} \\ F'_{jc} \geqslant \dfrac{n_0 mg\cos\theta_1}{\mu_{dc}} \end{cases} \tag{10}$$

式中 F'_{mc}——夹持输送时双联带与茎秆的摩擦力,N

F'_{jc}——夹持输送时双联带对大蒜的夹持力,N

n_0——安全系数

结合浮动轮浮动情况与夹持力和茎秆压缩的条件,通过式(8)~(10)可知,浮动轮的弹性系数应满足

$$\frac{1\,000 n_0 mg\cos\theta_1}{2\mu\Delta d} \leqslant k_0 \leqslant \frac{F_p}{2\mu\Delta d} \tag{11}$$

根据第 2 节测算的茎秆压缩断裂极限的数据,可求得 k_0为 1~5 N/mm。

3.4 定位切根切茎阶段分析

大蒜鳞茎定位对切根切茎至关重要,鳞茎下端始终与切根圆盘刀对齐,鳞茎上端被柔性按压导轨浮动按压。大蒜定位阶段受力分析如图 8 所示。

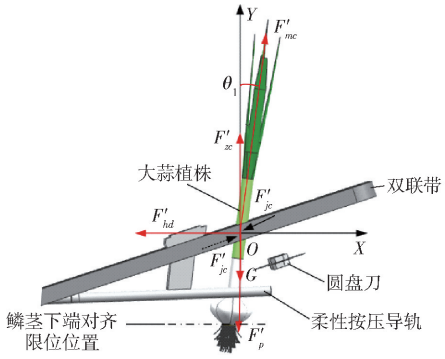


图 8 大蒜定位阶段受力分析

Fig. 8 Garlic positioning stage force analysis

确保大蒜顺利通过定位阶段且鳞茎下端对齐需要满足条件

$$\begin{cases} F'_{mc}\cos\theta_1 + F'_{zc} = G + F'_p \\ F'_p = \dfrac{1}{2}k'\Delta x' \\ F'_{hd} = F'_{mc}\sin\theta_1 = \mu' F'_p \end{cases} \tag{12}$$

式中 F'_{zc}——对大蒜鳞茎下端的支撑力,N

F'_p——按压导轨对大蒜鳞茎的按压力,N

F'_{hd}——鳞茎和按压导轨间滑动摩擦力,N

μ'——鳞茎和柔性按压导轨间滑动摩擦因数

k'——柔性按压导轨弹性系数,N/mm

$\Delta x'$——柔性按压导轨变形量,mm

保证蒜根完全切除且鳞茎不受损伤,求得柔性按压导轨的弹性系数 k'为 1.5 N/mm。

3.5 抛秧阶段分析

抛秧装置安装在输送装置末端,实现了大蒜蒜秧的快速抛离。抛秧运动示意图如图 9 所示。

基于速度差分原理,由图 9 可得

$$v_c = n_c v_2 = 2\pi R_c N_c \tag{13}$$

式中 v_c——抛秧差速轮圆周线速度,mm/s

n_c——差速系数

R_c——抛秧差速轮半径,mm

N_c——抛秧差速轮转速,r/s

保证蒜秧迅速拉出并抛离,求得 n_c为 1.6。

4 EDEM-MFBD 耦合仿真试验

大蒜收获田间试验受季节性限制,为增加装置

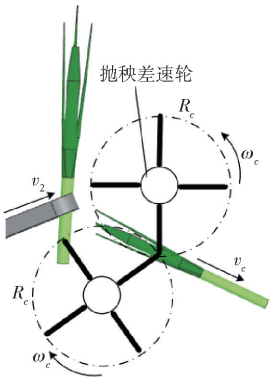


图 9　大蒜抛秧运动分析

Fig. 9　Garlic transplanting motion analysis

的可靠性、缩短设计和研制周期，对大蒜植株的作业过程采用离散元与多柔性体动力学（Multi flexible body dynamics，MFBD）进行耦合仿真，对收获过程的关键状态进行对比分析，验证装置可行性与先进性，为进一步参数优化提供指导。

4.1　EDEM－RecurDyn 耦合仿真模型建立

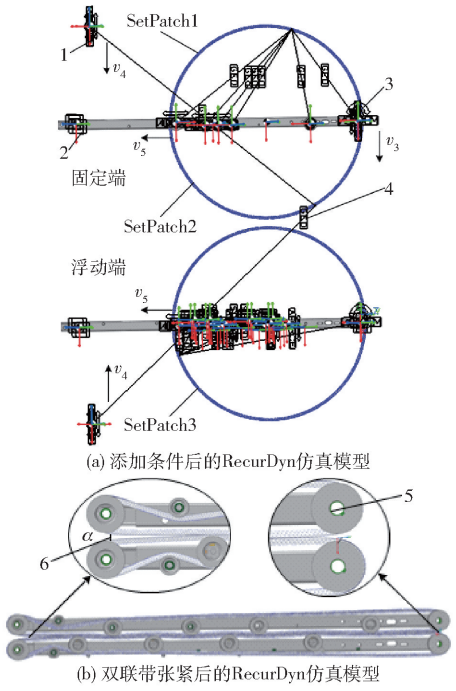
在大蒜夹持输送的实际工作过程中，大蒜植株处于颗粒力学和多体动力学共同组成的复杂环境之中，传统的 EDEM 模拟方法难以实现双联带和皮带轮（主动轮、浮动轮、固定轮、从动轮和压带轮）之间的复杂变刚度柔性夹持输送运动。因此需要通过多体动力学软件进行辅助模拟，将双联带柔性化处理，通过 EDEM－RecurDyn 耦合仿真的方式分析探究不同影响因素对夹持输送性能的影响并确定最优参数。

4.1.1　RecurDyn 仿真模型建立

利用 RecurDyn 多体动力学软件可以实现变刚度柔性夹持装置中双联带的柔性化处理和浮动轮的转动。为提高仿真效率和双联带网格能够均匀划分，对夹持输送模型装配体重新构建，把装配好的夹持输送模型导出为 Parasolid 格式文件，然后导入 RecurDyn 中。并将双联带进行网格均匀划分转换为柔性体，如图 10a 所示，设置双联带外表面为 SetPatch1、内表面为 SetPatch2、整个双联带为 SetPatch3。根据夹持输送的实际工作过程，在 RecurDyn 中添加约束（Joint）、运动（Motion）、力（Force）和接触（Conact）条件[21]。v_3 为固定端的移动方向，v_4 为压带轮的移动方向，v_5 为双联带的张紧方向和部分皮带轮的移动方向。为实现双联带的张紧，添加一根与皮带轮同轴心的短套，双联带张紧后的状态如图 10b 所示；创建双联带 SetPatch3 并以 wall 文件形式导出，实现柔性双联带与大蒜植株耦合作用的模拟。

4.1.2　EDEM 离散元模型建立

大蒜植株 EDEM 离散元构建的颗粒模型，采用



(a) 添加条件后的RecurDyn仿真模型

(b) 双联带张紧后的RecurDyn仿真模型

图 10　RecurDyn 仿真模型

Fig. 10　RecurDyn simulation model schematics

1. 平动副　2. 固定副　3. 旋转副　4. 接触副　5. 短套　6. 喂入角

山东省金乡县收获期大蒜植株作为研究对象。通过逆向工程技术得到三维模型后导入 EDEM，并通过颗粒快速填充功能，得到大蒜植株的多球面聚合颗粒模型，如图 11 所示。

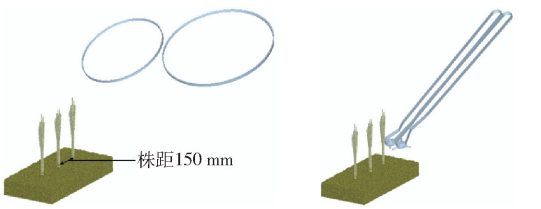


(a) 大蒜植株　(b) 三维模型　(c) 颗粒填充模型

图 11　大蒜植株模型

Fig. 11　Garlic plant models

将生成的 wall 文件导入 EDEM，并建立土壤颗粒和大蒜颗粒模型（株距为 150 mm），如图 12 所示。



(a) 导入wall后的EDEM模型　(b) 双联带张紧后的EDEM模型

图 12　EDEM 仿真模型

Fig. 12　EDEM simulation model

颗粒–颗粒、颗粒–大蒜接触模型均为 Hertz－Mindlin 无滑移接触模型。参考文献[22－26]设置

土壤颗粒、大蒜颗粒和双联带的本征参数及相互间接触参数如表 1 所示。

表 1 EDEM 主要参数

Tab. 1 Main parameters of EDEM

对象	参数	数值
土壤颗粒	密度/(kg·m^{-3})	1 480
	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	2.1×10^{7}
大蒜颗粒	密度/(kg·m^{-3})	198.7
	泊松比	0.27
	剪切模量/Pa	1.8×10^{6}
土壤颗粒-土壤颗粒	碰撞恢复系数	0.28
	动摩擦因数	0.05
	静摩擦因数	0.48
土壤颗粒-大蒜颗粒	碰撞恢复系数	0.5
	动摩擦因数	0.2
	静摩擦因数	0.43
大蒜颗粒-双联带	碰撞恢复系数	0.5
	动摩擦因数	0.19
	静摩擦因数	0.85

4.1.3 EDEM - RecurDyn 耦合仿真过程

基于 EDEM - RecurDyn 耦合对夹持输送的工作性能进行耦合仿真试验,仿真过程如图 13 所示。

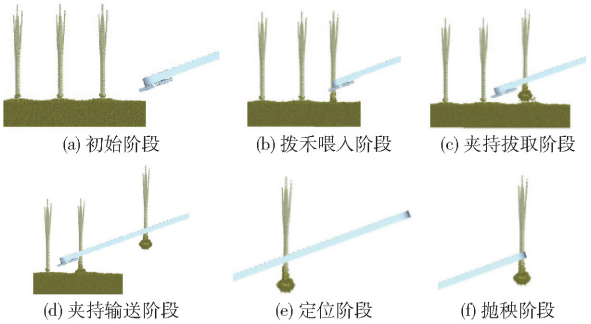


图 13 EDEM - RecurDyn 耦合仿真过程

Fig. 13 EDEM - RecurDyn simulation

4.2 单因素试验

根据第 3 节对关键参数的设计和 EDEM 后处理数据,结合现有夹持输送装置的研究成果,以夹持输送速度与前进速度速比 i、喂入角 α、浮动轮弹性系数 k_0 为试验因素,以夹持输送仿真过程中大蒜茎秆的受力情况进行单因素仿真试验,以输送成功率 Y_1、漏持率 Y_2、断茎率 Y_3 作为试验指标进行单因素台架试验。每次统计 100 株大蒜植株夹持输送情况,每组试验重复 3 次,统计输送成功株数 N_1、漏持株数 N_2 与断茎株数 N_3,计算试验指标 Y_1、Y_2、Y_3。

4.2.1 夹持输送速度与前进速度速比

夹持输送速度与前进速度速比是影响大蒜植株在夹持输送过程中是否堵塞的重要因素,因此在仿真和台架试验中,设定喂入角为 6°,浮动轮弹性系数为 3 N/mm,选取速比为 2.0、2.3、2.6、2.9、3.2 共 5 个水平进行单因素仿真和台架试验,试验结果如图 14 和表 2 所示。

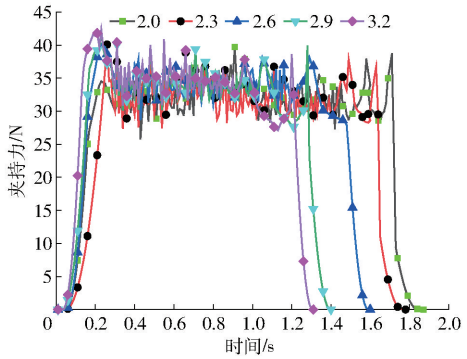


图 14 不同速比时夹持力变化曲线

Fig. 14 Curves of clamping force variation with different speed ratios

由图 14 可见,不同夹持输送速度与前进速度速比时整个过程的大蒜茎秆所受夹持力变化趋势相似,速比增大,输送速度加快,会减少大蒜植株在输送过程中的堵塞;由表 2 可见随着速比的增加,输送成功率先上升后降低,漏持率和断茎率先降低后上升,速比为 2.3 时,台架试验效果最佳,因此将速比确定为 2.0 ~ 2.6。

表 2 不同速比时试验结果

Tab. 2 Results of tests with different speed ratios

%

速比	试验序号	输送成功率	漏持率	断茎率	平均输送成功率	平均漏持率	平均断茎率
2.0	1	96	3	1	96.3	2.3	1.3
	2	95	3	2			
	3	98	1	1			
2.3	1	98	2	0	97.6	1.7	0.7
	2	97	2	1			
	3	98	1	1			
2.6	1	98	1	1	96.3	2.0	1.7
	2	96	2	2			
	3	95	3	2			
2.9	1	95	2	3	96.0	2.0	2.0
	2	97	2	1			
	3	96	2	2			
3.2	1	96	2	2	95.7	2.0	2.3
	2	96	1	3			
	3	95	3	2			

4.2.2 喂入角

喂入角是影响大蒜植株拨禾喂入和夹持拔取的重要因素,因此在仿真和台架试验中,设定夹持输送速度与前进速度速比为 2.3,浮动轮弹性系数为 3 N/mm,选取喂入角为 2°、4°、6°、8°、10° 共 5 个水

平进行单因素仿真和台架试验，试验结果如图 15 和表 3 所示。

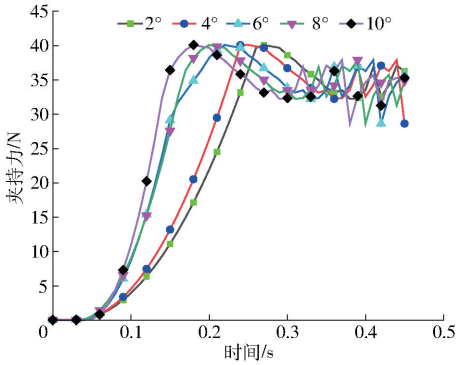


图 15　不同喂入角时夹持力变化曲线

Fig. 15　Curves of clamping force variation with different feed angles

表 3　不同喂入角时试验结果

Tab. 3　Results of test with different feeding angles

%

喂入角/(°)	试验序号	输送成功率	漏持率	断茎率	平均输送成功率	平均漏持率	平均断茎率
2	1	86	8	6	89.6	7.7	2.7
	2	90	6	4			
	3	93	3	4			
4	1	95	3	2	94.3	3.7	2.0
	2	92	5	3			
	3	96	3	1			
6	1	97	1	2	96.7	2.0	1.3
	2	95	3	2			
	3	98	2	0			
8	1	96	2	2	96.0	2.3	1.7
	2	97	2	1			
	3	95	3	2			
10	1	95	3	2	93.6	4.7	1.7
	2	93	4	2			
	3	93	6	1			

由图 15 可见喂入角对大蒜茎秆所受最大夹持力的影响不大，且在夹持点时达到最大，夹持点后的变化趋势基本相似；但由表 3 可见随着喂入角的增加，输送成功率先上升后降低，漏持率和断茎率先降低后升高，喂入角为 6°时，台架试验效果最佳，因此将拨禾喂入角确定为 4°～8°。

4.2.3　浮动轮弹性系数

浮动轮弹性系数是影响夹持力的重要因素，因此在仿真和台架试验中，设定夹持输送速度与前进速度速比为 2.3，喂入角为 6°，选取浮动轮弹性系数为 1、2、3、4、5 N/mm 共 5 个水平进行单因素仿真和台架试验，试验结果如图 16 和表 4 所示。

由图 16 可以看出不同弹性系数对大蒜茎秆受

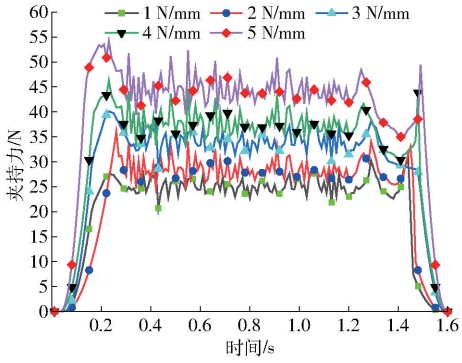


图 16　不同弹性系数时夹持力变化曲线

Fig. 16　Curves of clamping force variation with different elastic coefficients

表 4　不同弹性系数时试验结果

Tab. 4　Results of test with different elastic coefficients

%

弹性系数/(N·mm^{-1})	试验序号	输送成功率	漏持率	断茎率	平均输送成功率	平均漏持率	平均断茎率
1	1	93	5	2	94.6	3.7	1.7
	2	95	3	2			
	3	96	3	1			
2	1	96	2	2	95.3	3.0	1.7
	2	95	4	1			
	3	95	3	2			
3	1	97	2	1	96.3	2.3	1.3
	2	96	3	1			
	3	96	2	2			
4	1	97	2	1	97.3	1.7	1.0
	2	97	2	1			
	3	98	1	1			
5	1	95	2	3	95.6	1.7	2.7
	2	95	1	4			
	3	97	2	1			

力影响较大，但夹持输送过程受力趋势相似，弹性系数越大，夹持力越大；由表 4 可见随着弹性系数的增加，输送成功率先上升后下降，漏持率不断下降，断茎率先下降后上升，弹性系数为 4 N/mm 时，台架试验效果最佳，因此将弹性系数确定为 3～5 N/mm。

4.3　二次旋转正交组合试验

4.3.1　试验方案与结果

为进一步研究试验因素对夹持输送作业性能的影响，获得最优参数，依据单因素台架试验结果，开展三因素五水平的二次旋转正交组合多因素优化试验，共计 23 组。试验因素及编码如表 5 所示，试验设计方案与结果如表 6 所示，X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

4.3.2　方差分析

根据表 6 数据，运用数据处理软件 Design-Expert 软件进行多元回归拟合，建立评价指标与试

表 5 试验因素编码

Tab. 5 Code of test factors

编码	因素		
	速比 x_1	喂入角 x_2/(°)	弹性系数 x_3/(N·mm^{-1})
-1.682	2.00	4.00	3.00
-1	2.12	4.81	3.41
0	2.30	6.00	4.00
1	2.48	7.19	4.59
1.682	2.60	8.00	5.00

表 6 试验方案与结果

Tab. 6 Experimental program and results

试验号	因素			输送成功率 Y_1/%	漏持率 Y_2/%	断茎率 Y_3/%
	X_1	X_2	X_3			
1	-1	-1	-1	89.0	5.3	5.7
2	1	-1	-1	92.0	6.3	1.7
3	-1	1	-1	90.6	8.3	1.1
4	1	1	-1	92.0	7.7	0.3
5	-1	-1	1	89.0	5.7	5.3
6	1	-1	1	90.3	8.7	1.0
7	-1	1	1	91.0	5.3	3.7
8	1	1	1	91.0	6.6	2.4
9	-1.682	0	0	90.6	5.3	4.1
10	1.682	0	0	93.0	6.7	0.3
11	0	-1.682	0	89.7	6.0	4.3
12	0	1.682	0	91.7	6.6	1.7
13	0	0	-1.682	91.0	7.0	2.0
14	0	0	1.682	90.0	6.6	3.4
15	0	0	0	96.6	2.0	1.4
16	0	0	0	96.7	3.0	0.3
17	0	0	0	97.0	2.7	0.3
18	0	0	0	96.6	2.6	0.8
19	0	0	0	96.3	2.3	1.4
20	0	0	0	96.6	2.6	0.8
21	0	0	0	96.7	2.6	0.8
22	0	0	0	96.3	2.3	1.4
23	0	0	0	96.7	2.3	1.0

验因素的二次多项式回归模型。剔除不显著的回归项,其回归方程为

$$Y_1 = 97.15 + 0.71X_1 + 0.55X_2 - 0.29X_3 - 0.36X_1X_2 - 0.39X_1X_3 - 1.97X_1^2 - 2.37X_2^2 - 2.46X_3^2 \quad (14)$$

$$Y_2 = 2.49 + 0.52X_1 + 0.22X_2 - 0.41X_1X_2 + 0.49X_1X_3 - 0.86X_2X_3 + 2.03X_1^2 + 2.15X_2^2 + 2.33X_3^2 \quad (15)$$

$$Y_3 = 1.88 - 1.23X_1 - 0.77X_2 + 0.44X_3 + 0.77X_1X_2 + 0.73X_2X_3 \quad (16)$$

通过对回归系数的检验得出影响输送成功率、漏出率和断茎率的主次因素均为:速比、喂入角、弹性系数。

由表 7 进行回归方程方差分析可知,输送成功率、漏持率、断茎率的回归模型拟合度均 $P<0.01$,模型极显著,回归模型失拟项均 $P>0.05$,失拟项不显著,表明回归模型拟合度高。

4.3.3 响应面分析

为探究交互作用对输送成功率与漏持率的影响,进行交互项响应曲面分析,如图 17 所示。

图 17a、17d 为弹性系数处于零水平(4 N/mm)时,速比和喂入角的交互作用对输送成功率和漏持率的影响。当喂入角一定时,输送成功率随速比的增加先上升后降低,漏持率随着速比的增加先降低后上升;当速比一定时,输送成功率随喂入角的增加先上升后降低,漏持率随着喂入角的增加先降低后上升。

图 17b、17e 为喂入角处于零水平(6°)时,速比和弹性系数的交互作用对输送成功率和漏持率的影响。当弹性系数一定时,输送成功率随速比的增加先上升后降低,漏持率随着速比的增加先降低后上

表 7 方差分析

Tab. 7 ANOVA

方差来源	输送成功率				漏持率				断茎率			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	17.29	9	56.71	<0.000 1	14.58	9	22.27	<0.000 1	40.94	9	31.09	<0.000 1
X_1	6.94	1	204.87	<0.000 1	3.64	1	50.09	<0.000 1	20.64	1	141.07	<0.000 1
X_2	3.79	1	111.86	<0.000 1	0.60	1	8.24	0.015 2	7.41	1	50.60	<0.000 1
X_3	1.16	1	34.26	0.000 1	0.28	1	3.92	0.073 4	2.6	1	17.74	0.001 5
X_1X_2	1.05	1	31.03	0.000 2	1.36	1	18.71	0.001 2	4.8	1	32.83	0.000 1
X_1X_3	1.20	1	35.45	<0.000 1	1.90	1	26.14	0.000 3	0.08	1	0.55	0.475 2
X_2X_3	0.15	1	4.46	0.058 3	5.95	1	81.81	<0.000 1	4.2	1	28.73	0.000 2
X_1^2	0.39	1	11.39	0.006 2	0.41	1	5.65	0.036 7	<0.000 1	1	0.00	0.959 4
X_2^2	0.56	1	16.58	0.001 8	0.46	1	6.32	0.028 8	<0.000 1	1	0.04	0.854 7
X_3^2	0.60	1	17.79	0.001 4	0.54	1	7.44	0.019 7	<0.000 1	1	0.01	0.917 4
残差	0.37	11			0.80	11			1.61	11		
失拟	0.00	3	0.34	0.993 3	0.11	3	0.43	0.736 6	0.1	3	0.18	0.908 2
误差	0.37	8			0.69	8			1.51	8		
总和	204.03	22			107.32	22			59.21	22		

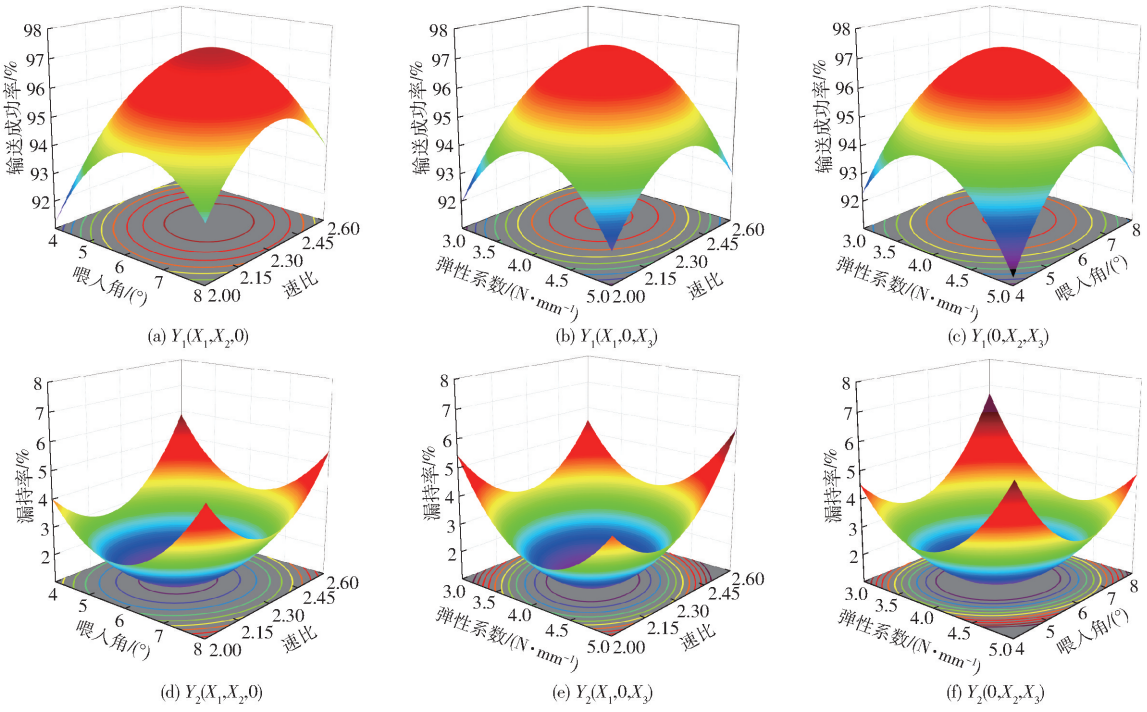


图 17　试验因素交互作用对输送成功率和漏持率影响的响应面

Fig. 17　Interactions of test factors on conveying success rate and drop rate

升；当速比一定时，输送成功率随弹性系数的增加先上升后降低，漏持率随着弹性系数的增加先降低后上升。

图 17c、17f 为当速比为零水平(2.3)时，喂入角和弹性系数的交互作用对输送成功率和漏持率的影响。当弹性系数一定时，输送成功率随喂入角的增加先上升后降低，漏持率随着喂入角的增加先降低后上升；当喂入角一定时，输送成功率随弹性系数的增加先上升后降低，漏持率随着弹性系数的增加先降低后上升。

5　参数优化与试验验证

为保证较高的输送成功率与较低的漏持率，进一步在水平约束条件下寻求各因素的最优组合，结合因素边界条件建立数学模型，并对评价指标回归模型进行多目标化求解，优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1,x_2,x_3) \\ \min Y_2(x_1,x_2,x_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 2.0 \leqslant x_1 \leqslant 2.6 \\ 4° \leqslant x_2 \leqslant 8° \\ 3\ \text{N/mm} \leqslant x_3 \leqslant 5\ \text{N/mm} \end{cases} \end{cases} \tag{17}$$

求解得到夹持输送性能最佳参数组合：速比为 2.31，喂入角为 6.2°，弹性系数为 3.95 N/mm，此时输送成功率为 97.21%，漏持率为 1.06%，断茎率为 1.73%。

为验证夹持输送装置的最优工作参数组合，于 2023 年 5 月 23 日在山东农业大学智能农业机械装备实验室以金乡杂交蒜品种为试验对象，保证土槽的紧实度和湿度与收获时田间效果接近，进行台架试验，大蒜植株总长度为 605～796 mm，茎秆直径为 9.11～16.53 mm，茎秆含水率为 60.25%～91.95%。如图 18 所示。喂入角为 6.2°，速比为 2.3，弹性系数为 3.9 N/mm，进行 5 次重复台架验证试验并对试验结果取平均值，平均输送成功率为 97.3%，漏持率为 1.0%，断茎率为 1.7%，夹持输送效果良好。



图 18　试验台架

Fig. 18　Test bench

1. 夹持输送装置　2. 控制箱　3. 绞盘　4. 试验台机架　5. 土槽　6. 大蒜植株

6　结论

(1)设计了一种大蒜变刚度柔性夹持输送装

置,结合大蒜不同含水率茎秆的物理特性试验和理论分析对夹持输送装置主要结构参数进行了设计;阐明了变刚度柔性夹持可提高输送性能的机理,提高了输送成功率,降低了漏持率和断茎率。

(2)利用 EDEM - MFBD 耦合仿真方法,建立大蒜植株和夹持输送耦合仿真模型,通过耦合仿真试验,分析了在夹持输送过程中不同影响因素对大蒜茎秆受力的影响,进一步验证了变刚度柔性夹持输送装置的可靠性与先进性。

(3)通过单因素试验分析、二次回归正交旋转组合试验分析和响应面分析得出了变刚度柔性夹持输送装置关键因素对指标的影响规律,求解其最优参数并进行台架验证试验。台架试验结果表明:夹持输送速度与前进速度速比为 2.3,喂入角为 6.2°,浮动轮弹性系数为 3.9 N/mm 时,平均输送成功率为 97.3%,漏持率为 1.0%,断茎率为 1.7%,夹持输送效果良好,满足设计要求。

参 考 文 献

[1] 崔荣江,张华,徐文艺,等. 我国大蒜机械化生产现状及发展思路探讨[J]. 农机化研究,2015,37(3):264 - 268.
CUI Rongjiang, ZHANG Hua, XU Wenyi, et al. Discussion on the present situation and development of garlic mechanized production in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(3): 264 - 268. (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] 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)

[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] 刘军帅,于志威. 大蒜联合收获机现状及发展方向探讨[J]. 拖拉机与农用运输车,2019,46(6):11 - 13.
LIU Junshuai, YU Zhiwei. Current situation and development direction of garlic combine harvester[J]. Tractor & Farm Transporter, 2019, 46(6): 11 - 13. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 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.

[8] 樊佳博,李骅,傅杰一,等. 单行大蒜联合收获机的设计与试验[J]. 江西农业学报,2022,34(3):202 - 208.
FAN Jiabo, LI Hua, FU Jieyi, et al. Design and experiment of single-row garlic combine harvester[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2022, 34(3): 202 - 208. (in Chinese)

[9] 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)

[10] 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 1):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. 1): 138 - 141. (in Chinese)

[11] 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)

[12] 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)

[13] 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)

[14] 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)

[15] 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)

[16] 侯加林,方立志,张海阔,等. 多重扰动清种式大蒜单粒取种排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(1):65－75.
HOU Jialin,FANG Lizhi,ZHANG Haikuo,et al. Design and experiment of multi-disturbance cleaning and single-seed sowing device for garlic[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):65－75. (in Chinese)

[17] 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)

[18] 辛杰,侯加林,李玉华,等. 成熟期大蒜茎秆力学特性的试验研究[J]. 农机化研究,2018,40(12):168－178.
XIN Jie,HOU Jialin,LI Yuhua,et al. Study on pelleting coating movement and experiment of wheat-grass seeds under vibration [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(12):168－178. (in Chinese)

[19] 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.

[20] 郝付平,陈志,张子瑞,等. 拨禾星轮式玉米收获台设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(6):112－117.
HAO Fuping,CHEN Zhi,ZHANG Zirui,et al. Design and experiment of corn harvester head with reel star wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(6):112－117. (in Chinese)

[21] 刘晓寅. 斗式提升机输送链传动系统的优化设计与仿真研究[D]. 长春:吉林大学,2018.
LIU Xiaoyin. Optimization design and simulation study of conveyor chain transmission system for bucket elevator[D]. Changchun:Jilin University,2018. (in Chinese)

[22] 赖庆辉,贾广鑫,苏微,等. 基于 DEM－MBD 耦合的链勺式人参精密排种器研究[J]. 农业机械学报,2022,53(3):91－104.
LAI Qinghui,JIA Guangxin,SU Wei,et al. Design and test of chain-spoon type precision seed-metering device for ginseng based on DEM－MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):91－104. (in Chinese)

[23] 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)

[24] 刘全程. 双充种室大蒜定向播种机的设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
LIU Quancheng. Design and experiment of garlic directional planter with double filling chamber[D]. Taian:Shandong Agricultural University,2022. (in Chinese)

[25] 张海阔. 多重扰动清种式大蒜播种机的设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2023.
ZHANG Haikuo. Design and experiment of multi-disturbance cleaning garlic seeder[D]. Taian:Shandong Agricultural University,2023. (in Chinese)

[26] 王善博,阿力木·买买提吐尔逊,黄强斌,等. 基于 EDEM－RecurDyn 耦合的玉米剥皮装置仿真分析与试验[J]. 中国农机化学报,2023,44(10):115－120.
WANG Shanbo,ALYM MEMETTRSUN,HUANG Qiangbin,et al. Simulation analysis and experiment of a maize peeling device based on EDEM－RecurDyn coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2023,44(10):115－120. (in Chinese)