doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.024

基于 EDEM－MFBD 的挖拔式大蒜联合收获装置设计与试验

侯　瑞[1]　刘鲁鹏[2]　辛　丽[3]　沈景新[4]　周　凯[2]　侯加林[2]　李玉华[2]

（1. 北京邮电大学人工智能学院，北京 100876；2. 山东农业大学机械与电子工程学院，泰安 271018；
3. 山东省玛丽亚农业机械股份有限公司，济宁 272000；4. 山东省农业机械科学研究院，济南 250100）

摘要：针对大蒜联合收获机在大蒜植株挖掘、拔取过程中常出现的破土碎土效果差、拔取阻力大、壅土严重等问题，设计了一种挖拔组合式大蒜联合收获装置。阐述和分析了该装置的整体结构和工作原理，通过动力学分析和理论计算，对关键部件的运动学物理量、受力情况、基本结构参数和空间位置关系进行了优化设计。利用 EDEM－MFBD 耦合仿真方法，建立了大蒜-土壤-挖拔装置接触模型，确定影响挖拔收获性能的关键因素，并对挖拔收获过程进行微观和宏观分析，探究了大蒜、土壤和挖拔收获装置之间的相互作用关系，揭示了挖拔收获机理。以整机前进速度、铲尖到夹持点水平距离和挖掘铲振动幅度为试验因素进行了单因素仿真试验，以土壤 BOND 键断裂数量、大蒜茎秆拉拔力和土壤隆起高度为试验指标分析了不同作业参数的影响，进行二次回归正交旋转组合试验。试验结果表明，当整机前进速度为 434.3 mm/s、铲尖到夹持点水平距离为 144.6 mm、挖掘铲振动幅度为 6.1 mm，土壤 BOND 键断裂数量为 78 283，大蒜茎秆拉拔力为 20 N，土壤隆起高度为 42.1 mm，挖掘、拔取效果最好。为验证优化后的挖拔收获装置作业性能，进行了田间试验，满足设计要求。

关键词：大蒜联合收获机；挖拔收获装置；作用机理；EDEM－MFBD

中图分类号：S225.92　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)11-0253-11　　**OSID**：

Design and Test of Digging-pulling Type Garlic Combine Harvester Based on EDEM－MFBD

HOU Rui[1]　LIU Lupeng[2]　XIN Li[3]　SHEN Jingxin[4]　ZHOU Kai[2]　HOU Jialin[2]　LI Yuhua[2]

(1. *School of Artificial Intelligence*, *Beijing University of Posts and Telecommunications*, *Beijing* 100876, *China*
2. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
3. *Shandong Maria Machinery Co.*, *Ltd.*, *Jining* 272000, *China*
4. *Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences*, *Ji'nan* 250100, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of poor soil breaking effect, high pulling resistance, and serious soil accumulation often encountered during the digging and pulling processes of garlic combine harvesters, a digging-pulling combination type garlic combine harvesting device was designed. The overall structure and working principle of this device were elaborated and analyzed. Through dynamic analysis and theoretical calculations, the kinematic physical quantities, force conditions, basic structural parameters, and spatial position relationships of key components were optimized. Using the EDEM－MFBD coupled simulation method, a contact model among garlic, soil, and the digging-pulling device was established to identify key factors affecting harvesting performance. Microscopic and macroscopic analyses were conducted on the digging-pulling process to explore the interaction relationships between garlic, soil, and the harvesting device, revealing the mechanism of combined digging and pulling harvesting. Single-factor simulation experiments were performed with machine forward speed, horizontal distance from shovel tip to clamping point, and vibration amplitude of the excavating shovel as experimental factors. Test indicators

收稿日期：2024－08－02　修回日期：2024－09－10

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)、山东省重点研发计划项目(2024TZXD072、2024TSGC0624、2024BTJH012)和山东省技术创新引导计划项目(YDZX2024032)

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

通信作者：李玉华(1983—)，男，副教授，博士，主要从事智能农业装备研究，E-mail：liyuhua@sdau.edu.cn

included the number of broken soil BOND bonds, pulling force on garlic stalks, and soil heave height. A quadratic regression orthogonal rotational composite experiment was then carried out. Results showed that optimal performance occurred at a forward speed of 434.3 mm/s, horizontal distance of 144.6 mm, and vibration amplitude of 6.1 mm, achieving 78 283 broken soil BOND bonds, 20 N pulling force on stalks, and 42.1 mm soil heave height. To verify the working performance of the optimized digging and harvesting device, field tests were conducted, which met the design requirements.

Key words: garlic combine harvester; digging-pulling harvesting device; mechanism of action; EDEM – MFBD

0 引言

挖掘和拔取是根茎类作物收获的主要方式,大蒜收获主要分为分段式和联合式[1-4]。分段式收获技术相对成熟,但收获后仍需要大量的劳动力进行捡拾、切茎、除根、分选、晾晒,费时费力[5-6]。联合式收获技术复杂,在大蒜植株挖掘、拔取过程中仍存在挖拔配合不协调、破土碎土效果差、拔取阻力大、壅土严重等问题,严重制约了大蒜产业的发展[7-10]。

挖拔组合式(简称挖拔式)大蒜联合收获装置主要机理是通过大蒜、土壤和挖拔装置之间的相互作用,实现挖掘、拔取的低阻、高效协同作业。HOU 等[11]设计了一种新型大蒜联合收获机,实现了工作过程中蒜苗的姿态校正、夹持、切割和低损伤收集。WANG 等[12]设计了一种挖掘-拉拔木薯收获机智能夹拔装置,提出一种基于 YOLO v4 的田间秸秆实时检测方法,实现了夹紧位置可相对于秸秆位置自动调整。王宏波[13]设计了一种振动铲掘夹拔式芋头挖掘机,采用挖拔组合和振动挖掘的方式进行收获作业,实现了减阻降耗、减少壅土,提高了芋头收获质量。WANG 等[14]设计了一种大葱挖拔收获装置,基于 EDEM 对土壤-葱-挖拔机构进行仿真分析,实现了大葱低损伤收获的要求。ZOU 等[15]设计了一种基于离散元法的菠菜振动铲切割装置,实现了菠菜聚集和根土分离。挖拔组合式收获理念已成为根茎类作物收获主要发展方向,其中 EDEM – MFBD 耦合仿真技术在作物、土壤与农机具之间的相互作用研究中被普遍应用[16-23]。

综上所述,为解决大蒜植株挖掘、拔取过程中存在的挖拔配合不协调、破土碎土效果差、拔取阻力大、壅土严重等问题,设计一种挖拔式大蒜联合收获装置,提出了一种大蒜-土壤-挖拔装置之间的相互作用机制研究方法,通过理论计算、动力学分析、耦合仿真和试验,对关键参数进行分析与优化,以增加大蒜联合收获机在大蒜挖掘、拔取过程中的破土碎土能力、减小拔取阻力和避免壅土问题,达到挖拔收获性能最佳效果。

1 挖拔式大蒜联合收获装置结构与工作原理

1.1 结构

挖拔式大蒜联合收获装置是自走式大蒜联合收获机的重要工作模块,在大蒜挖掘、拔取协同作业过程中起到关键性作用,主要由限深轮机构、限深主体架、扶禾机构、振动挖掘铲机构、夹持输送机构、螺杆、液压杆、双联带等组成,其结构如图 1 所示。

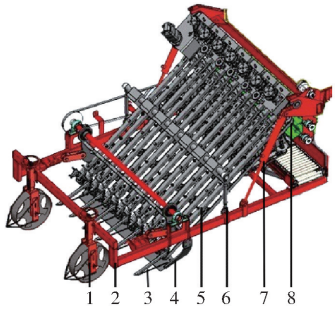


图 1 挖拔式大蒜联合收获装置结构示意图

Fig. 1 Digging-pulling type garlic combine harvester structure schematic

1. 限深轮机构 2. 限深主体架 3. 扶禾机构 4. 振动挖掘铲机构 5. 夹持输送机构 6. 螺杆 7. 液压杆 8. 双联带

1.2 工作原理

挖拔式大蒜联合收获装置在工作前,根据大蒜的生长、倒伏状况和土壤的湿度、硬度状况,对夹持输送机构的夹持点高度和振动挖掘铲机构的挖掘深度进行调节,夹持输送机构的倾斜角和振动挖掘铲机构的入土角也随之变化。当大蒜茎秆含水率较低、倒伏严重时,降低夹持点高度,以减少漏持、断茎等问题;当大蒜土壤湿度大或者硬度较大时,降低挖掘深度,以增加破土碎土效果、减少壅土等问题。

通过调节限深轮机构,可以同时调节夹持输送机构的夹持点高度和振动挖掘铲机构的挖掘深度,两者同时升高或降低;通过调节螺杆的长度,挖掘铲机构的挖掘深度保持不变,夹持输送机构的夹持点升高或降低;调节液压杆可将挖拔式大蒜联合收获装置抬起和降落;根据大蒜收获状况,对以上机构进行适当调节,以满足最佳收获效果,进而减损增效。

2　关键部件分析与设计

2.1　运动学分析

挖拔式大蒜联合收获装置的运动情况不仅影响挖掘和拔取的协同配合作业，还影响整机工作的稳定性和功耗，是影响大蒜收获效率的关键性因素。挖掘铲机构可看作四杆机构，在两极限位置为挖掘铲振动的最低点和最高点，挖掘铲运动分析如图 2 所示。

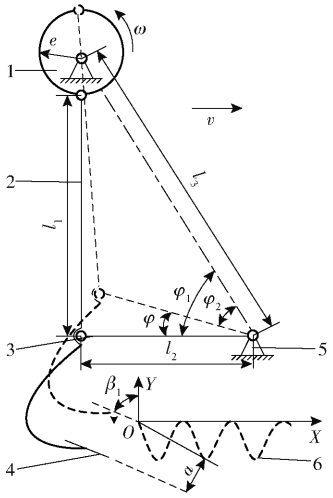


图 2　挖掘铲运动分析图

Fig. 2　Digging shovel motion analysis diagram

1. 偏心轮　2. 摇杆　3. 连杆　4. 挖掘铲　5. 固定支座　6. 铲尖运动轨迹

挖掘铲铲尖运动由牵引方向匀速直线运动和绕固定支座摆动叠加成的倾斜正弦振动[24－25]，铲尖的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = a\cos\beta_1 \sin(\omega t) + vt \\ y = -a\sin\beta_1 \cos(\omega t) \end{cases} \tag{1}$$

式中　x——铲尖水平位移，mm

y——铲尖垂直位移，mm

a——挖掘铲振动幅度，mm

β_1——振动角，(°)

ω——偏心轮角速度，rad/s

v——整机前进速度，mm/s

t——整机前进时间，s

对式(1)求导得

$$\begin{cases} v_x = a\omega\cos\beta_1 \cos(\omega t) + v \\ v_y = a\omega\sin\beta_1 \sin(\omega t) \end{cases} \tag{2}$$

式中　v_x——铲尖水平分速度，mm/s

v_y——铲尖垂直分速度，mm/s

由式(2)可得铲尖速度为

$$v_j = \sqrt{(a\omega\cos\beta_1\cos(\omega t) + v)^2 + (a\omega\sin\beta_1\sin(\omega t))^2} \tag{3}$$

式中　v_j——铲尖绝对速度，mm/s

由余弦定理可知，近似存在以下关系[26]

$$\begin{cases} \varphi_1 = \arccos\dfrac{l_2^2 + l_3^2 - (l_1 - e)^2}{2l_2 l_3} \\ \varphi_2 = \arccos\dfrac{l_2^2 + l_3^2 - (l_1 + e)^2}{2l_2 l_3} \\ \varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \\ a = \dfrac{\pi\varphi R}{180°} \end{cases} \tag{4}$$

式中　φ_1——连杆与两铰接点间直线最大夹角，(°)

φ_2——连杆与两铰接点间直线最小夹角，(°)

φ——挖掘铲摆角，(°)

l_1——摇杆上两铰接点间长度，mm

l_2——连杆长度，mm

l_3——两支撑铰接点间长度，mm

e——偏心距，mm

R——铲尖到固定支座距离，mm

通过式(1)～(4)求得整机前进速度取值范围为 300～700 mm/s，挖掘铲振幅 a 的取值范围为 5～13 mm。

2.2　力学分析

挖掘铲阻力和双联带拉拔力对整机的能量损耗和大蒜收获损失有重要影响，为了研究挖拔作业情况，对大蒜植株和挖掘铲进行受力分析，如图 3 所示。H 为挖拔过程中土壤隆起高度，β_2 为双联带水平倾角。

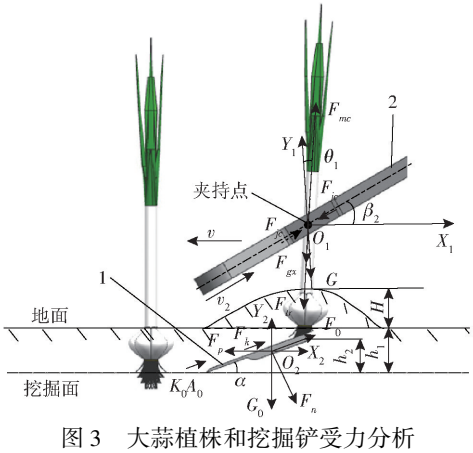


图 3　大蒜植株和挖掘铲受力分析

Fig. 3　Forces analysis on garlic plant and digging shovel

1. 挖掘铲　2. 双联带

根据图 3，由微积分原理和相关理论可知大蒜夹持拔取时满足

$$\begin{cases} F_{mc} = F_{tr} + F_{gx} + G\cos\theta_1 \\ F_{tr} = \displaystyle\int_0^{h_1} 2\pi r K\mu_{tc}\gamma h\,\mathrm{d}h \\ F_{mc} = \mu_{dc}F_{jc} \end{cases} \tag{5}$$

式中　F_{mc}——夹持拔取时双联带与茎秆摩擦力，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
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,kg/m^3
h——鳞茎底部沿拔取方向与地面距离,mm
h_1——挖掘深度,mm

挖掘铲铲面入土角 α 直接影响挖掘铲的作业性能和大蒜收获质量[27-28]。为了保证大蒜的顺利挖掘和拔取,挖掘铲受力应满足

$$\begin{cases} F_p-(F_0+F_k+K_0A_0)\cos\alpha-F_n\sin\alpha\geqslant 0 \\ (F_0+F_k+K_0A_0)\sin\alpha-F_n\cos\alpha-G_0\geqslant 0 \\ F_0=\mu_0F_n \end{cases} \tag{6}$$

式中 F_p——挖掘铲铲面水平牵引力,N
F_0——挖掘铲铲面与土壤之间摩擦力,N
F_k——挖掘铲铲面土壤纯切削阻力,N
F_n——挖掘铲铲面法向力,N
K_0——土壤与挖掘铲铲面附着力系数,N/m^2
A_0——挖掘铲铲面面积,m^2
α——挖掘铲铲面入土角度,(°)
G_0——挖掘铲重力,N
μ_0——土壤与挖掘铲铲面摩擦因数

参考其他根茎类作物挖拔收获参数,结合大蒜的种植农艺,通过式(5)、(6)可得大蒜挖掘铲铲面入土角度 α 的调节范围为 18°~25°,满足土壤压力系数 K 的取值范围,此时挖掘铲的入土性能好,茎秆拔取阻力小。

2.3 结构参数设计

为了确保 7 行大蒜的有效挖掘,结合实际情况,保证挖掘铲低阻高效地挖起大蒜,避免壅土,对挖掘铲的基本结构参数进行设计优化,如图 4 所示。

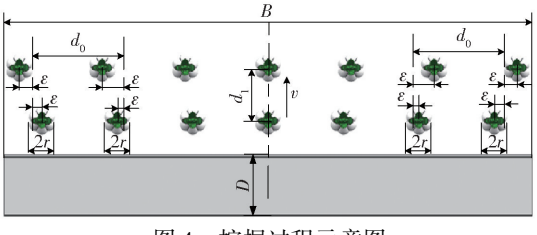


图 4 挖掘过程示意图

Fig. 4 Schematic of digging process

考虑到收获机行驶和种植农艺对齐偏差,挖掘铲宽度和长度应满足

$$\begin{cases} B\geqslant 6d_0+12r+12\varepsilon+\eta \\ D=\dfrac{h_2}{\sin\alpha}+\dfrac{v^2\cos\varphi_3}{2g\sin(\alpha+\varphi_3)} \end{cases} \tag{7}$$

式中 B——挖掘铲宽度,mm
d_0——大蒜行距,mm
D——挖掘铲长度,mm
ε——种植农艺对齐偏差,mm
η——收获机驾驶行驶偏差,mm
h_2——挖掘铲后端距离挖掘面的高度,mm
φ_3——土壤对挖掘铲的摩擦角,(°)

研究结果表明,大蒜鳞茎半径 r 为 21~32 mm;大蒜植株分布行距 d_0 为 180~220 mm;种植农艺对齐偏差 ε 为 2~10 mm;收获机驾驶行驶偏差 η 为 60~90 mm,土壤对挖掘铲的摩擦角 φ_3 为 30°~36°。为降低功耗并满足挖拔需要,通过式(7),设计挖掘铲宽度 B 为 1 400 mm,长度 D 为 170 mm,厚度 T 为 12 mm。

2.4 空间位置关系分析

挖拔组合式大蒜联合收获装置的空间位置关系是指夹持点和挖掘铲铲尖之间在纵剖面上的空间坐标距离。空间位置关系决定了作业顺序以及作业质量,理想的作业过程为挖掘铲深入到大蒜须根底部将大蒜和部分土壤掘出,之后大蒜和土壤混合体沿着铲面向上运动,在重力和剪切力的作用下土壤松碎,同时,大蒜茎秆进入夹持输送机构的喂入口,在双联带的作用下,大蒜从松碎的混合体中拔出,粘有散土继续向上运动。理想挖掘过程以及夹持输送机构和挖掘铲之间的位置关系如图 5 所示。

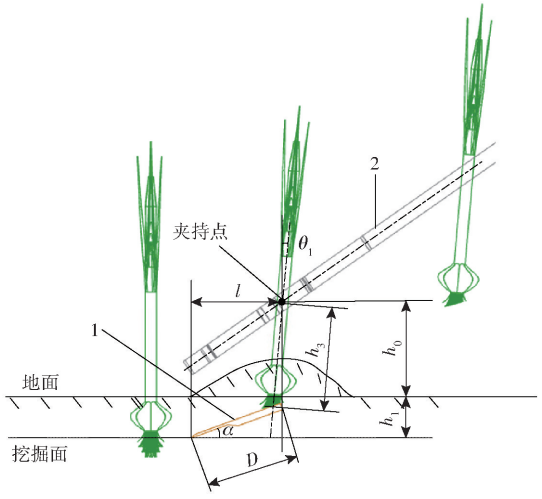


图 5 空间位置关系图

Fig. 5 Spatial location relationship diagram

1. 挖掘铲 2. 双联带

大蒜和土壤混合物沿铲面上升到挖掘铲末端时,最容易将大蒜从土壤中拔出,此时夹持力达到最

大，根据图 5 几何关系可以得到

$$\begin{cases} h_0 = h_3\cos\theta_1 + D\sin\alpha - h_2 \\ l = D\cos\alpha \end{cases} \tag{8}$$

式中　h_0——夹持点高度，mm

h_3——夹持点到大蒜根部的距离，mm

l——夹持点到铲尖的水平距离，mm

通过式(8)可知 l 的取值范围为 128～152 mm。

3　EDEM－MFBD 耦合仿真试验

挖掘、拔取是大蒜整株收获的重要环节，挖掘过程决定了大蒜植株的运动状态、土壤破碎情况等，从而对大蒜收获损失产生影响，因而需要对挖拔过程进行深入研究。大蒜-土壤-挖拔收获装置之间的相互作用是研究挖拔过程的核心问题，但由于大蒜-土壤-挖拔装置之间的相互作用十分复杂，所以需要对挖拔过程进行微观和宏观分析。目前国内外对土壤与农机具之间的相互作用关系进行了大量的研究，普遍采用离散元与多柔性体动力学(Multi flexible body dynamics，MFBD)耦合仿真对其研究，并取得较好的效果。但是作物-土壤-农机具互作研究较少，特别是挖拔过程，通过对挖拔过程进行微观分析可以探究挖拔机理，为大蒜机械化设计提供合理的依据。

3.1　EDEM－RecurDyn 耦合仿真模型建立

借助 EDEM－RecurDyn 联合仿真平台对大蒜挖掘、拔取过程进行多柔性体动力学分析，进一步揭示大蒜挖拔机理，探究不同影响因素对挖拔收获性能的影响，以期验证装置的可行性与先进性，为参数优化提供指导。

根据大蒜种植农艺，为提高仿真效率，在 EDEM 中建立尺寸(长×宽×高)为 450 mm×200 mm×200 mm 的虚拟土槽，在土槽中建立株距为 150 mm 的大蒜模型，参考文献[29－35]设置主要本征参数与接触参数，如表 1 所示。

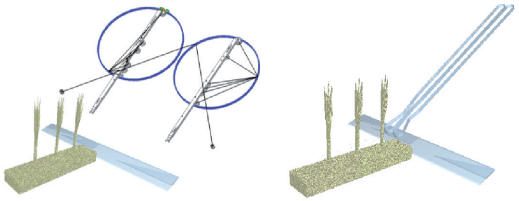
利用 RecurDyn 内置 Mesher 模块，对双联带进行四面体网格划分，共得到 4 997 个节点、3 919 个单元，设置同步带的弹性模量 7 966 MPa，泊松比 0.475，杨氏模量 350 MPa，建立双联带柔性体模型。基于挖拔式大蒜联合收获装置工作原理进行相关约束(Joint)、运动(Motion)、力(Force)和接触(Conact)的定义，针对张紧、挖掘、夹持、拔取过程添加 IF(time－0.2:0,0,x＊pi)驱动函数[36]。

创建 wall 文件进行与 EDEM 的数据交换，最终实现大蒜-土壤-挖拔装置耦合作用的模拟，仿真过程如图 6 所示。

表 1　EDEM 主要参数

Tab. 1　Main parameters setting 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
	半径/mm	2
茎秆颗粒	密度/(kg·m^{-3})	198.7
	泊松比	0.27
	剪切模量/Pa	1.8×10^6
	半径/mm	1
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
茎秆颗粒-茎秆颗粒	碰撞恢复系数	0.5
	动摩擦因数	1.2
	静摩擦因数	0.8
土壤颗粒-挖掘铲	碰撞恢复系数	0.4
	动摩擦因数	0.32
	静摩擦因数	0.01
茎秆颗粒-双联带	碰撞恢复系数	0.5
	动摩擦因数	0.09
	静摩擦因数	0.85



(a) RecurDyn仿真模型　　(b) EDEM仿真模型

图 6　大蒜-土壤-挖拔装置 EDEM－RecurDyn 仿真模型

Fig. 6　EDEM－RecurDyn simulation model of garlic－soil－digging and pulling device

3.2　单因素试验

整机前进速度 v、铲尖到夹持点水平距离 l 和挖掘铲振动幅度 a 作为影响挖拔收获性能的主要因素，对土壤 BOND 键断裂数量、大蒜茎秆拉拔力、土壤隆起高度、根土运动、挖掘阻力和根土分离影响显著。由挖拔理论和仿真分析可知，大蒜茎秆拉拔力、土壤隆起高度都与土壤 BOND 键断裂数量有关，因而本试验将整机前进速度 v、铲尖到夹持点水平距离 l 和挖掘铲振动幅度 a 作为试验因素，以土壤 BOND 键断裂数量、大蒜茎秆拉拔力和土壤隆起高度作为试验评价指标，根据第 2 节关键部件设计分析，取整机前进速度 v 为 300、400、500、600、700 mm/s，铲尖到夹持点水平距离 l 为 128、134、140、146、152 mm，挖掘铲振动幅度 a 为 5、7、9、11、13 mm，进行单因素仿真试验。

3.2.1　土壤 BOND 键断裂数量分析

为了探究挖掘、拔取过程对 BOND 键断裂的影响，

对大蒜-土壤-挖拔装置复合模型进行耦合仿真试验，土壤 BOND 键断裂情况如图 7 所示。断裂的土壤 BOND 键用红色显示，通过对比发现，挖掘、拔取协同作业对土壤 BOND 键断裂效果较好，大蒜鳞茎和根部周围土壤 BOND 键断裂数量较多。由图 8 可见，土壤 BOND 键断裂数量随着整机前进速度的增大先增大后减小再增大，随着铲尖到夹持点水平距离的增大先增大后减小，随着挖掘铲振动幅度的增大而不断增大。

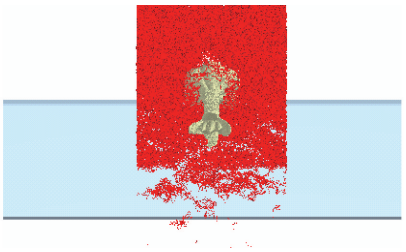


图 7 土壤 BOND 键断裂情况

Fig. 7 State of broken soil BOND bond

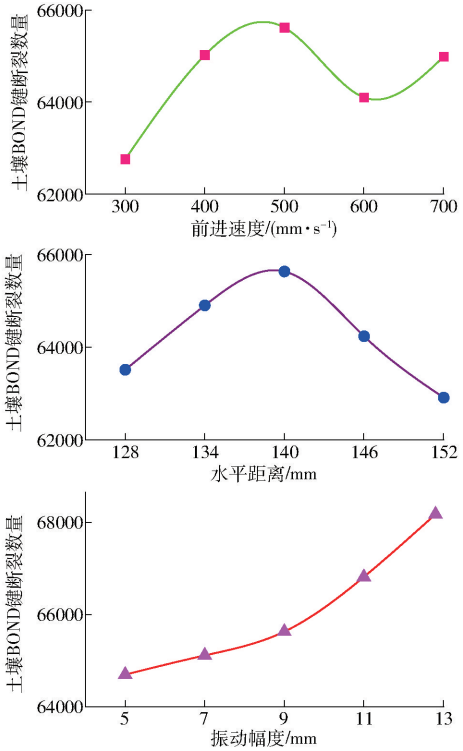


图 8 土壤 BOND 键断裂数量单因素仿真试验结果

Fig. 8 Results of one-factor simulation test on number of broken soil BOND bond

3.2.2 大蒜茎秆拉拔力分析

挖拔装置的参数设置决定了蒜土复合运动形态以及拉拔力，从而对大蒜收获损失产生影响，大蒜茎秆受力运动情况如图 9 所示。大蒜植株在双联带夹持拔取时，大蒜茎秆受到的拉拔力最大，并产生弯曲变形，从土壤中拔出后向斜后方运动。由图 10 可见，大蒜茎秆拉拔力随着整机前进速度的增大而增大，随着铲尖到夹持点水平距离的增大而减小，随着挖掘铲振动幅度的增大而缓慢增大。

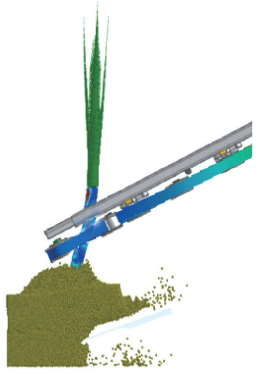


图 9 大蒜茎秆受力情况

Fig. 9 Forces on garlic stem

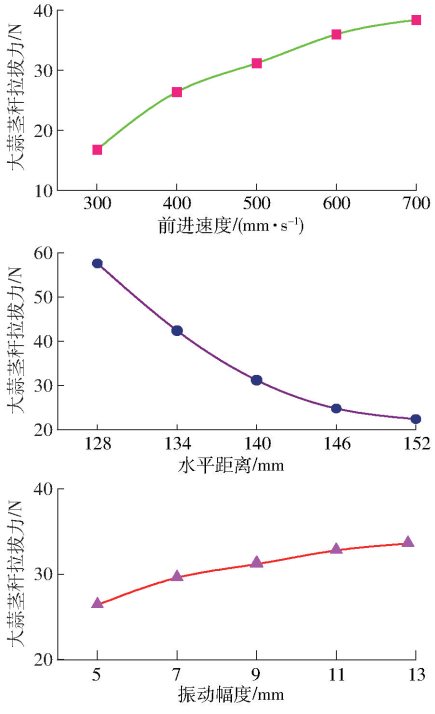


图 10 大蒜茎秆拉拔力单因素仿真试验结果

Fig. 10 Results of one-factor simulation test on pulling force of garlic stem

3.2.3 土壤隆起高度分析

在挖掘、拔取过程中，土壤隆起过高容易使隆起的土壤触及到夹持输送机构，导致喂入、夹持、拔取效果不好，大蒜-土壤-挖拔装置复合模型耦合仿真运动规律如图 11 所示。从图中可以看出，大蒜鳞茎和根部周围土壤相对速度较大，有利于隆起的土壤松散，降低土壤的紧实度，减少壅土。由图 12 可见，土壤隆起高度随着整机前进速度的增大先减小后增大，随着铲尖到夹持点水平距离增大而浮动变化，随着挖掘铲振动幅度的增大而不断增大。

3.3 二次旋转正交组合试验

3.3.1 试验方案与结果

为进一步研究试验因素对挖拔收获性能的影响，获得最优参数，依据单因素仿真试验的结果，开展三因素五水平的二次旋转正交组合多因素优化试

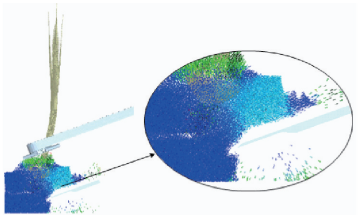


图 11　大蒜-土壤-挖拔装置互作过程速度矢量图

Fig. 11　Vector diagram of speed of garlic－soil－digging and pulling device interaction process

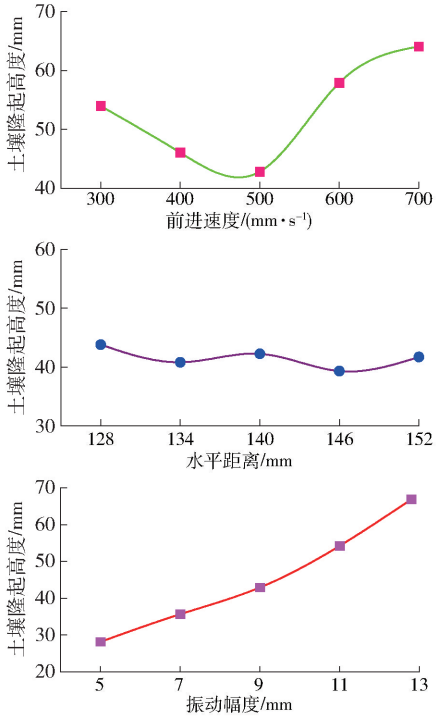


图 12　土壤隆起高度单因素仿真试验结果

Fig. 12　Results of one-factor simulation test of soil augmentation height

验，共计 23 组。试验因素及编码如表 2 所示，试验设计方案与结果如表 3 所示，X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Codes of test factors

编码	因素		
	前进速度/(mm·s⁻¹)	水平距离/mm	振动幅度/mm
－1.682	400.0	134.00	5.0
－1	440.5	136.43	5.8
0	500.0	140.00	7.0
1	559.5	143.57	8.2
1.682	600.0	146.00	9.0

3.3.2　方差分析

根据表 3 数据，运用 Design-Expert 进行多元回归拟合，构建土壤 BOND 键断裂数量 Y_1、大蒜茎秆拉拔力 Y_2 和土壤隆起高度 Y_3 对整机前进速度(X_1)、铲尖到夹持点水平距离(X_2)和挖掘铲振动幅度

表 3　试验方案与结果

Tab. 3　Experimental program and results

试验号	因素			土壤 BOND 键断裂数量	大蒜茎秆拉拔力/N	土壤隆起高度/mm
	X_1	X_2	X_3			
1	－1	－1	－1	68 345	35	38
2	1	－1	－1	70 881	42	42
3	－1	1	－1	64 682	15	35
4	1	1	－1	58 543	33	35
5	－1	－1	1	70 420	43	38
6	1	－1	1	83 966	34	40
7	－1	1	1	80 453	36	38
8	1	1	1	79 509	40	40
9	－1.682	0	0	69 907	33	35
10	1.682	0	0	77 452	43	40
11	0	－1.682	0	81 646	30	42
12	0	1.682	0	66 363	28	40
13	0	0	－1.682	63 133	34	39
14	0	0	1.682	90 855	36	41
15	0	0	0	69 437	20	38
16	0	0	0	70 528	30	38
17	0	0	0	69 331	28	38
18	0	0	0	68 282	30	39
19	0	0	0	64 099	28	39
20	0	0	0	68 816	29	39
21	0	0	0	65 905	29	38
22	0	0	0	68 242	29	39
23	0	0	0	68 519	26	40

(X_3)3 个自变量的二次多项式响应面回归模型。剔除不显著的回归项，各自变量对应的编码值(X_1、X_2、X_3)与试验评价指标(Y_1、Y_2、Y_3)的回归方程依次为

$$Y_1 = 103\,464.1 + 1\,588.03X_1 - 2\,317.76X_2 + 7\,213.62X_3 - 2\,895.63X_1X_2 + 2\,025.63X_1X_3 + 2\,697.13X_2X_3 \quad (9)$$

$$Y_2 = 23.61 + 2.7X_1 - 2.66X_2 + 2.3X_3 + 3X_1X_2 - 3.75X_1X_3 + 3.5X_2X_3 \quad (10)$$

$$Y_3 = 53.02 + 1.2X_1 - 1.12X_2 + 0.69X_3 + 1.25X_2X_3 - 7.82X_1^2 - 6.79X_2^2 - 7.34X_3^2 \quad (11)$$

由表 4 回归方程方差分析可知，土壤 BOND 键断裂数量、大蒜茎秆拉拔力和土壤隆起高度的回归模型均 $P<0.01$，模型影响极显著，回归模型失拟项均 $P>0.05$，失拟项影响不显著，表明回归模型拟合度高。

3.3.3　响应面分析

为探究交互作用对 BOND 键断裂数量和大蒜茎秆拉拔力的影响，绘制交互项响应曲面，如图 13 所示。

表 4 方差分析

Tab. 4 ANOVA

方差来源	土壤 BOND 键断裂数量				大蒜茎秆拉拔力				土壤隆起高度			
	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	1.04×10^{9}	9	18.73	<0.000 1	626	9	5.76	0.004 3	72	9	16.72	<0.000 1
X_1	3.44×10^{7}	1	5.58	0.037 6	99	1	8.22	0.015 3	20	1	41.43	<0.000 1
X_2	6.73×10^{7}	1	10.90	0.007 1	89	1	7.36	0.020 2	16	1	33.05	0.000 1
X_3	7.11×10^{8}	1	115.17	<0.000 1	72	1	5.96	0.032 7	6	1	13.49	0.003 7
X_1X_2	6.71×10^{7}	1	10.87	0.007 1	72	1	5.96	0.032 7	2	1	4.20	0.065 0
X_1X_3	3.28×10^{7}	1	5.32	0.041 6	113	1	9.31	0.011 0	0	1	0.00	1.000 0
X_2X_3	5.82×10^{7}	1	9.43	0.010 6	98	1	8.11	0.015 8	13	1	26.27	0.000 3
X_1^2	2.96×10^{7}	1	4.80	0.051 0	4	1	0.31	0.589 6	6	1	12.79	0.004 3
X_2^2	2.77×10^{7}	1	4.48	0.057 8	1	1	0.06	0.816 1	5	1	9.64	0.010 0
X_3^2	2.28×10^{7}	1	3.69	0.080 9	2	1	0.16	0.695 5	5	1	11.28	0.006 4
残差	6.79×10^{7}	11			133	11			5	11		
失拟	3.71×10^{7}	3	3.22	0.082 7	55	3	1.88	0.212 1	1	3	0.82	0.516 9
误差	3.08×10^{7}	8			78	8			4	8		
总和	1.27×10^{9}	22			1 012	22			80	22		

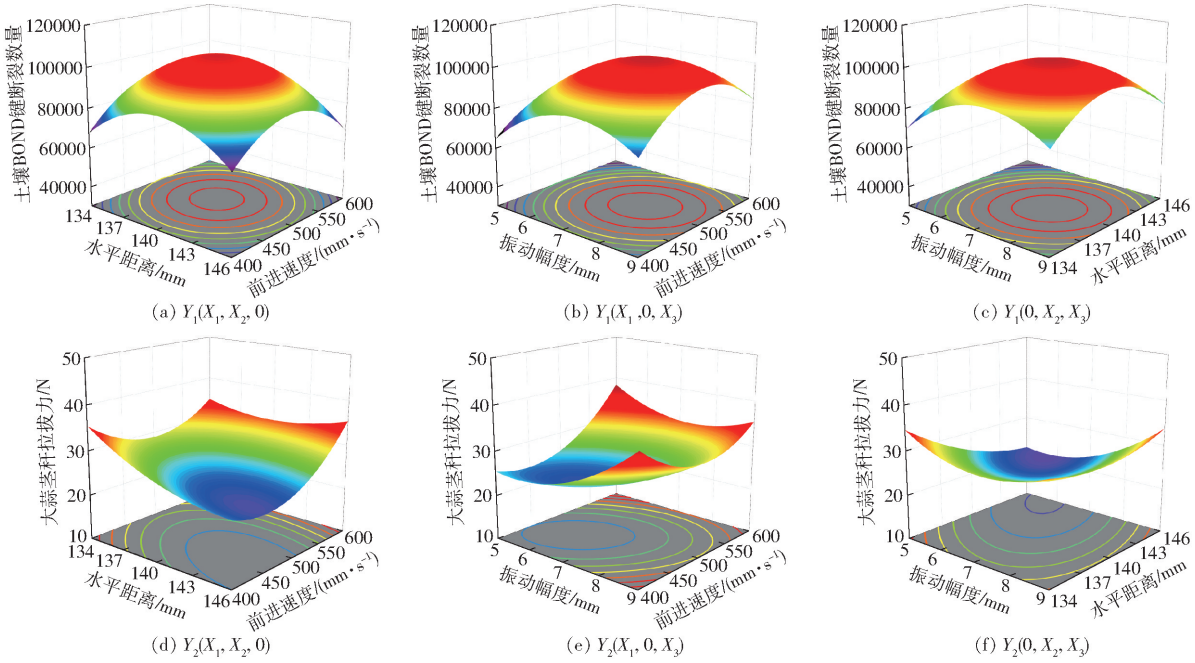


图 13 试验因素交互作用对土壤 BOND 键断裂数量和大蒜茎秆拉拔力影响的响应面

Fig. 13 Influence of test factor interactions on number of soil BOND bond breaks and garlic stem pulling force

图 13a、13d 为振动幅度处于零水平(7 mm)时,前进速度和水平距离的交互作用对土壤 BOND 键断裂数量和大蒜茎秆拉拔力的影响。当水平距离一定时,土壤 BOND 键断裂数量随前进速度的增加先增加后减小,大蒜茎秆拉拔力随着前进速度的增加而增加;当前进速度一定时,土壤 BOND 键断裂数量随水平距离的增加先增加后减小,大蒜茎秆拉拔力随着水平距离的增加而减小。

图 13b、13e 为水平距离处于零水平(140 mm)时,前进速度和振动幅度的交互作用对土壤 BOND 键断裂数量和大蒜茎秆拉拔力的影响。当振动幅度一定时,土壤 BOND 键断裂数量随前进速度的增加先增加后减小,大蒜茎秆拉拔力随着前进速度的增加先减小后增加;当前进速度一定时,土壤 BOND 键断裂数量随振动幅度的增加先增加后减小,大蒜茎秆拉拔力随着振动幅度的增加而增加。

图 13c、13f 为前进速度处于零水平(500 mm/s)时,水平距离和振动幅度的交互作用对土壤 BOND 键断裂数量和大蒜茎秆拉拔力的影响。当振动幅度一定时,土壤 BOND 键断裂数量随水平距离的增加先增加后减小,大蒜茎秆拉拔力随着水平距离的增加而略微减小;当水平距离一定时,土壤 BOND 键

断裂数量随振动幅度的增加先增加后减小，大蒜茎秆拉拔力随着振动幅度的增加而增加。

3.4　参数优化

为寻求挖拔组合式大蒜联合收获装置最优工作参数，基于构建的回归模型，进行土壤 BOND 键断裂数量和大蒜茎秆拉拔力多目标优化，其优化目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1,X_2,X_3) \\ \min Y_2(X_1,X_2,X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1.682 \leqslant X_1 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_2 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_3 \leqslant 1.682 \end{cases} \end{cases} \tag{12}$$

采用 Design-Expert 10.0 软件的 Optimization 模块对各参数进行多目标优化求解，优化求解结果为：整机前进速度为 434.3 mm/s，铲尖到夹持点水平距离为 144.6 mm，挖掘铲振动幅度 6.1 mm，此时土壤 BOND 键断裂数量为 78 283、大蒜茎秆拉拔力为 20 N，土壤隆起高度为 42.1 mm；对优化求解的参数圆整后，取整机前进速度 435 mm/s、铲尖到夹持点水平距离 145 mm、挖掘铲振动幅度 6 mm。

4　试验验证

为验证挖拔式大蒜联合收获装置的最优工作参数组合，于 2024 年 5 月 21 日在山东省济宁市金乡县王丕镇康桥村以金乡杂交蒜品种为试验对象，进行田间试验（图 14）。大蒜种植方式为平作，种植深度为 51～72 mm，行距为 180 mm，大蒜自然高度为 405～696 mm，土壤类型为壤土，土壤硬度为 683～883 kPa，土壤含水率为 12.26%～18.03%。以整机前进速度 435 mm/s、铲尖到夹持点水平距离 145 mm 和挖掘铲振动幅度 6 mm 进行田间验证试验，试验效果如图 15 所示，土壤破碎效果较好，损失率低，无壅土现象，满足设计要求。



图 14　大蒜收获田间试验

Fig. 14　Field experiment on garlic harvest

1. 蒜头收集装置　2. 蒜头输送装置　3. 挖拔装置　4. 土壤含水率测定仪　5. 土壤硬度测定仪



图 15　大蒜收获田间试验效果

Fig. 15　Results of field experiment on garlic harvest

5　结论

（1）提出了一种作物、土壤和农机具相互作用机制的研究方法，设计了一种挖拔组合式大蒜联合收获装置；通过动力学分析和理论计算，对关键部件的运动学物理量、受力情况、基本结构参数和空间位置关系进行了优化设计。阐明了挖掘、拔取协调配合可提高收获性能，提高收获效率，降低损失。

（2）利用 EDEM－MFBD 耦合仿真方法，建立了大蒜-土壤-挖拔装置接触模型，并对挖拔过程进行微观和宏观分析，探究了大蒜植株、土壤和挖拔收获装置之间的相互作用关系，揭示了挖拔收获机理。

（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挖拔组合式大蒜联合收获装置关键因素对指标的影响规律，求解其最优参数并进行田间验证试验。田间试验结果表明：整机前进速度 435 mm/s、铲尖到夹持点水平距离为 145 mm 和挖掘铲振动幅度 6 mm，挖拔效果较好，满足设计要求。

参　考　文　献

[1]　DING A L, PENG B L, YANG K, et al. Design of a machine vision-based automatic digging depth control system for garlic combine harvester[J]. Agriculture, 2022, 12(12): 2119.

[2]　LI Y H, LI C, LIU L P, et al. Design and test of the plant-correcting reel for harvesting lodging garlic plants[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(1): 59－68.

[3]　张学剑，戴飞，史瑞杰，等. 振动分离式根茎类中药材收获机设计与试验[J]. 干旱地区农业研究，2024，42(3)：264－275.
ZHANG Xuejian, DAI Fei, SHI Ruijie, et al. Design and experiment of vibrating separating rhizome harvesting machine for Chinese medicinal materials[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(3): 264－275. (in Chinese)

[4]　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)

[5] 王利远,李天华,牛子孺,等. 分段式大蒜收获机的设计与试验[J]. 农机化研究,2020,42(1):86 - 90.
WANG Liyuan, LI Tianhua, NIU Ziru, et al. Design of the sectional type garlic harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(1): 86 - 90. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 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)

[8] 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)

[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] 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.

[12] WANG Yang, XI Junhui, WANG Zhihao, et al. Embedded field stalk detection algorithm for digging-pulling cassava harvester intelligent clamping and pulling device[J]. Agriculture, 2023, 13: 2144.

[13] 王宏波. 振动铲掘夹拔式芋头挖掘机设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
WANG Hongbo. Design and test of vibratory shovel digging clip-pull taroexcavator[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[14] WANG Fangyan, QIU Zhuchuan, PAN Yongfei, et al. DEM-based parameter optimization and tests of digging green onions[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(4): 126 - 133.

[15] ZOU Liangliang, YAN Dawei, NIU Ziru, et al. Parametric analysis and numerical optimisation of spinach root vibration shovel cutting using discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 108138.

[16] LI Yuyao, HU Zhichao, GU Fengwei, et al. DEM - MBD coupling simulation and analysis of the working process of soil and tuber separation of a potato combine harvester[J]. Agronomy, 2022, 12: 1734.

[17] 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)

[18] SHI Linrong, ZHAO Wuyun, CHENG Tinghua, et al. Study on the intercropping mechanism and seeding improvement of the cavity planter with vertical insertion using DEM - MBD coupling method[J]. Agriculture, 2022, 12: 1567.

[19] MA Shuai, XU Liming, XU Shucai, et al. Wear study on flexible brush-type soil removal component for removing soil used to protect grapevines against cold[J]. Biosystems Engineering, 2023, 228: 88 - 104.

[20] KIM Y S, LEE S D, BEAK S M, et al. Development of DEM - MBD coupling model for draft force prediction of agricultural tractor with plowing depth[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202: 107405.

[21] CHEN Mingdong, LIU Xiaotong, HU Pengxiang, et al. Study on rotor vibration potato-soil separation device for potato harvester using DEM - MBD coupling simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 218: 108638.

[22] XIE Dongbo, HE Jiaxun, LIU Tao, et al. Establishment and validation the DEM - MBD coupling model of flexible straw-Shajiang black soil-walking mechanism interactions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109203.

[23] YANG Zhikai, ZHANG Keping, ZHANG Yang, et al. Discrete element method-multibody dynamics coupling simulation and experiment of rotary tillage and ridging process for chili pepper cultivation[J]. Agronomy, 2024, 14(3): 446.

[24] 母刚,段富海,张国琛,等. 菲律宾蛤仔采捕机振动松土装置设计与试验[J]. 大连理工大学学报,2018,58(1):9 - 16.
MU Gang, DUAN Fuhai, ZHANG Guochen, et al. Design and experimental study of oscillation device of scarification for *Ruditapes philippinarum* dredger[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2018, 58(1): 9 - 16. (in Chinese)

[25] 张永华,匡玉兰,陈颖,等. 液压激振式马铃薯收获机挖掘装置的设计[J]. 西南农业学报,2013,26(2):783 - 788.
ZHANG Yonghua, KUANG Yulan, CHEN Ying, et al. Design of hydraulic vibration potato harvester mining device[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(2): 783 - 788. (in Chinese)

[26] 张建新,王家胜,赵国庆,等. 振动式土壤切削挖掘阻力试验台设计[J]. 农机化研究 2021,43(9):93－97.
ZHANG Jianxin,WANG Jiasheng,ZHAO Guoqing,et al. Design for test-bed of vibration type soil digging resistance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2021,43(9):93－97. (in Chinese)
[27] LIU Shihao,WENG Shaojie,LIAO Yulan,et al. Structural bionic design for digging shovel of cassava harvester considering soil mechanics[J]. Applied Bionics and Biomechanics,2014,11(1－2):1－11.
[28] 李涛,周进,徐文艺,等. 4UGS2 型双行甘薯收获机的研制[J]. 农业工程学报,2018,34(11):26－33.
LI Tao,ZHOU Jin,XU Wenyi,et al. Development of 4UGS2 type double-row sweet potato harvester[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(11):26－33. (in Chinese)
[29] ZHANG Lei,ZHAI Yibin,CHEN Jianneng,et al. Optimization design and performance study of a subsoiler underlying the tea garden subsoiling mechanism based on bionics and EDEM[J]. Soil and Tillage Research,2022,220:105375.
[30] SONG Wei,JIANG Xiaohu,LI Leka,et al. Increasing the width of disturbance of plough pan with bionic inspired subsoilers[J]. Soil and Tillage Research,2022,220:105356.
[31] 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)
[32] 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)
[33] 张兆国,薛浩田,王一驰,等. 基于离散元法的三七仿生挖掘铲设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(5):100－111.
ZHANG Zhaoguo,XUE Haotian,WANG Yichi,et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic excavating shovel based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(5):100－111. (in Chinese)
[34] 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)
[35] 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)
[36] 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)

(上接第 233 页)

[16] 胡建平,刘育彤,刘伟,等. 蔬菜自动移栽机顶夹拔组合式取苗装置试验研究[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 1): 110－117,184.
HU Jianping,LIU Yutong,LIU Wei,et al. Experimental study on the combined seedling picking device of top clamping and pulling for automatic vegetable transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(Supp. 1):110－117,184. (in Chinese)
[17] 刘洋,何义川,韩绿化,等. 蔬菜穴盘苗自动取苗机构研究进展[J]. 新疆农垦科技,2023,46(6):52－56.
LIU Yang, HE Yichuan, HAN Lühua, et al. Research progress of automatic seedling extraction mechanism for vegetable hole tray seedlings[J]. Xinjiang Agricultural Reclamation Science and Technology,2023,46(6):52－56. (in Chinese)
[18] 任朝阳,胡敏娟,严伟,等. 旱地穴盘苗移栽机取苗机构研究现状[J]. 中国农机化学报,2025,46(2):41－47.
REN Chaoyang, HU Minjuan, YAN Wei, et al. Current status of research on seedling picking mechanism of dryland hole tray seedling transplanting machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2025,46(2):41－47. (in Chinese)
[19] YAO Mengjiang,LV Junpeng,WANG Lianghui, et al. Cooperative operation method of seedling conveying and picking by full-automatic transplanter based on multi-sensor combination[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2024,225:9311.
[20] 中华人民共和国农业部. 油菜移栽机质量评价技术规范 NY/T 1924—2010[S]. 北京:中国农业出版社,2010.