doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.004

基于离散元法的百合鳞茎弹性多趾揉搓辊组设计与试验

杨玉婉[1,2]　任旭光[1,2]　杨明企[2]　柏　鹏[2]　徐俊杰[2]　黄玉祥[1,2]　席新明[2]　刘正道[2]

(1.西北农林科技大学海南研究院, 三亚 572025; 2.西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对百合鳞茎机械化收获程度低且茎-土分离效果差、损伤严重等问题,本文基于百合鳞茎基本物理力学特性,运用仿生学原理,设计了一种弹性多趾揉搓辊组。通过测量百合鳞茎基本物理力学参数,得到其平均尺寸为 83.7 mm×74.6 mm×49.0 mm,密度为 1.09 g/cm^3,与聚氨酯材料静、动摩擦因数分别为 0.50、0.42。根据百合鳞茎采收要求,建立百合鳞茎在弹性多趾揉搓辊组上的动力学微分方程,得到影响其收获性能的关键因素包括:揉搓趾长 L、辊轴转速 ω 和单周趾数 N。在 EDEM 软件中建立弹性多趾揉搓辊组-土壤-百合鳞茎互作用仿真模型,以百合鳞茎明茎率 Y_1、最大碰撞力 Y_2 为评价指标,运用 Box-Behnken 中心组合设计方法开展三因素三水平正交试验,通过构建目标函数以及约束条件进行优化逼近,确定最优参数组合:L 为 52 mm、ω 为 54 r/min、N 为 6,在最优参数组合下,Y_1 为 97.25%、Y_2 为 12 N。田间试验结果表明,明茎率与最大碰撞力仿真值与试验值相对误差分别为 1.51% 和 21.05%,且试制的弹性多趾揉搓式百合收获装置较传统输送链式收获装置明茎率提高 3.3%、损伤率降低 13%,具有优异的收获性能,能够满足根茎类中药材收获机质量评价相关要求。研究结果可为根茎类中药材机械化收获提供方案。

关键词: 百合鳞茎; 弹性多趾揉搓; 茎土分离; 损伤; 仿生

中图分类号: S225.7$^+$9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)07-0048-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Elastic Multi-toed Rubbing Roller Group for Lily Bulbs Based on Discrete Element Method

YANG Yuwan[1,2]　REN Xuguang[1,2]　YANG Mingqi[2]　BAI Peng[2]　XU Junjie[2]　HUANG Yuxiang[1,2]　XI Xinming[2]　LIU Zhengdao[2]

(1. *Hainan Institute of Northwest A&F University*, *Sanya* 572025, *China*

2. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of low mechanization degree and poor stem-soil separation effect as well as severe damage during the mechanized harvesting of lily bulbs, based on the basic physical and mechanical properties of lily bulbs, a set of elastic multi-toed rubbing roller group was designed by applying bionics principles. By measuring the basic physical and mechanical parameters of lily bulbs, it was found that their average size was 83.7 mm×74.6 mm×49.0 mm, density was 1.09 g/cm^3, and the rolling friction coefficient with polyurethane material was 0.42, while the static friction coefficient was 0.50. According to the requirements of lily bulb harvesting, the dynamic differential equation of lily bulbs on the elastic multi-toed rubbing roller group was established. The key factors affecting the harvesting performance of lily bulbs were found to be: the length of the rubbing toe (L), the rotational speed of the roller shaft (ω), and the number of toes per week (N). A simulation model of the interaction between the elastic multi-toed rubbing roller group, soil, and lily bulbs was established in the EDEM software. With the clear stem rate Y_1 and the maximum collision force Y_2 of lily bulbs as evaluation

收稿日期: 2025-05-10　修回日期: 2025-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52305282)、陕西省自然科学基础研究计划项目(2023-JC-QN-0219)、陕西省重点产业创新链项目(2024SF-ZDCYL-03-09)和陕西省农业科技创新及农业关键核心技术攻关项目(2024NYGG011-08)

作者简介: 杨玉婉(1992—),女,副教授,博士,主要从事农业工程仿生理论与技术研究,E-mail: yuwan_yang@nwafu.edu.cn

通信作者: 刘正道(1992—),男,讲师,博士,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: liuzd@nwsuaf.edu.cn

indicators, a three-factor three-level orthogonal experiment was conducted by using the Box－Behnken central composite design method. Through the construction of the objective function and constraint conditions for optimization approximation, the optimal parameter combination was determined as: L was 52 mm, ω was 54 r/min and N was 6. Under the optimal parameter combination, the clear stem rate Y_1 of lily bulbs was 97.25% and the maximum collision force Y_2 was 12 N. Field experiments verified that the relative errors between the simulation values and the experimental values of the clear stem rate and the maximum collision force were 1.51% and 21.05%, respectively. Moreover, the trial-made elastic multi-toed rubbing lily harvesting device, compared with the traditional conveyor chain-type harvesting device, increased the clear stem rate by 3.3% and reduced the damage rate by 13%, demonstrating excellent harvesting performance, and meeting the relevant requirements for the quality evaluation of root and rhizome Chinese medicinal material harvesters. The research results can provide a solution for the mechanized harvesting of root and rhizome Chinese medicinal materials.

Key words: lily bulb; elastic multi-toed rubbing; stem-soil separation; damage; bionic

0　引言

目前百合机械化生产水平较低，其鳞茎采收环节仍主要靠人工完成，劳动强度大、生产效率低[1-2]。而其他根茎类作物收获机械通用化程度不高，茎-土分离过程极易造成百合鳞茎损伤，影响整体作业效果[3-5]。因此开展土壤-百合鳞茎分离机理研究，设计收获装置，对实现百合鳞茎高效低损化收获和推动百合产业快速发展具有重要意义。

近年来，离散元方法在根茎作物机械化收获过程分析、茎土分离机理研究等方面应用广泛。李晓晖等[6]通过 EDEM－Fluent 耦合仿真，建立了马铃薯-土块-摆抖筛离散元模型，分析其土壤分离机理，设计了一款气筛式马铃薯清选装置，提高了马铃薯洁净率、降低了破损率；汪昕等[7]通过 EDEM－RecurDyn 耦合仿真，设计了一款自走式马铃薯捡拾机，运用中心组合试验方法，最终提高了马铃薯收获效率、降低了损伤率；CHEN 等[8]通过 DEM－MBD 耦合仿真，解决了马铃薯薯土分离过程中振动输送链振点选取问题，提高了马铃薯明茎率、降低了损伤率；王兴欢等[9]基于离散元方法分析薯土分离过程中薯块-土块-扰动杆相互作用关系，解决了大块土壤在马铃薯收获过程中难以破碎的问题。

此外，仿生方法在农机领域的应用也极为广泛。郑嘉鑫等[10]模仿切叶蚁上颚结构，设计了两种不同的仿生切割刀片，并对其进行正交试验和参数优化，有效提高了三七茎叶采收完整率和降低了其漏割率；YANG 等[11]模仿鼹鼠前足多趾结构，设计了一种仿生旋耕刀，有效降低了旋耕机作业功耗并提高了其作业质量；王海翼等[12]模仿河狸门齿结构，设计了一种仿生切碎刀具，以减小青贮玉米收获过程中的切割阻力；TANG 等[13]根据北美獾爪的结构特征，设计了一种仿生开沟器，降低了其作业过程中的土壤阻力。田鼠是一种地下栖居类动物，在挖土过程中，其强有力的前爪粘满土壤，轻轻甩动或者摩擦，便可脱落大部分土壤。研究发现，田鼠前足爪趾内轮廓曲线呈复杂变曲率特征，使其具有优异减粘脱土性能[14-16]，可为收获装置优化设计提供仿生学依据。

基于离散元方法，本文采用仿生学原理，设计一种弹性多趾揉搓辊组，通过分析弹性多趾揉搓辊组与百合鳞茎间的互作用关系并建立其动力学微分方程，得到影响百合鳞茎收获性能的主要因素，并通过弹性多趾揉搓辊组-土壤-百合鳞茎互作用过程仿真获得最优参数组合，最后通过田间试验验证及作业性能评估，以期为百合机械化收获技术提升与装备研发提供理论支撑和技术参考。

1　百合鳞茎基本物理力学特性与收获机总体结构

1.1　百合鳞茎基本物理力学特性

以甘肃兰州百合为研究对象，其种植模式以垄作为主，垄高 200～300 mm，垄宽 600～800 mm，垄间距 150～200 mm，每垄 2～3 行。百合鳞茎呈椭球形，由白色鳞片环抱而成，鳞片紧密贴合在一起，形成鳞茎主体结构，如图 1 所示。取 60 个成熟期百合鳞茎样本，经游标卡尺测量，得到其长度 d_a、宽度 d_b、高度 d_h 平均值分别为 83.7、74.6、49.0 mm；通过浸液法[17]，测得其密度为 1.09 g/cm^3；通过斜面仪测量法[18]，得到其与聚氨酯材料间静、动摩擦因数为 0.50、0.42。

1.2　总体结构与主要技术参数

弹性多趾揉搓式百合收获机整体结构如图 2 所示，总体结构包括振动挖掘装置、弹性多趾揉搓辊组、传动机构、机架、限深轮等。振动挖掘装置主要完成挖掘后土壤-百合鳞茎首次分离功能，弹性多趾揉搓辊组负责后续茎-土分离以及输送功能。工作时，收获机由手扶式拖拉机牵引前进，其挖掘铲先切

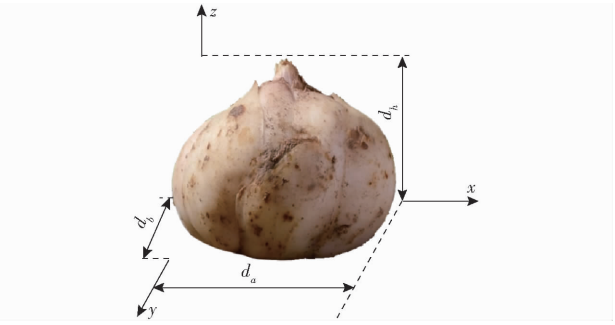


图 1 百合鳞茎尺寸图

Fig. 1 Diagram of lily bulb sizes

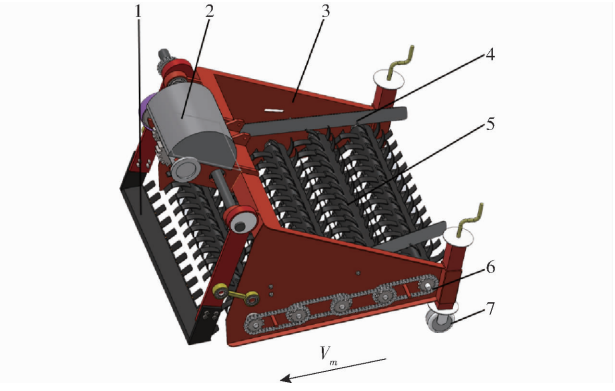


图 2 弹性多趾揉搓式百合收获机整机结构图

Fig. 2 Structure diagram of elastic multi-toe rubbing lily harvester

1. 振动挖掘装置 2. 齿轮箱 3. 机架 4. 收拢板 5. 弹性多趾揉搓辊组 6. 同步链条 7. 限深轮

削入土,将埋在地底的百合鳞茎及土壤挖起,随着挖掘装置在曲柄驱动下的连续往复抖动,被挖出的茎-土混合物进行初步地破碎、分离,部分破碎的土块将从输送间隙中落下,而未破碎土块和鳞茎在前端土壤挤压力作用下推送至弹性多趾揉搓辊组上,在相互交错的仿生揉搓趾"揉搓、摩擦"作用下,进一步去除百合鳞茎表层土壤,同时拨送百合鳞茎向后逐级移动,在多级仿生揉搓趾共同作用下,有效分离黏重土壤和清除百合鳞茎表层土壤,最终,从土块中分离出的百合鳞茎被输送到弹性多趾揉搓辊组末端,并落至地面,而碎土块则从弹性多趾揉搓辊轴间隙中落下,从而完成整个收获过程。弹性多趾揉搓式百合收获机技术参数如表 1 所示。

表 1 弹性多趾揉搓式百合收获机主要参数

Tab. 1 Main parameters of elastic multi-toe rubbing lily harvester

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	740×700×650
配套动力/kW	7~30
输入转速/(r·min^{-1})	1 176
收获幅宽/mm	700
挖掘深度/mm	0~300
作业速度/(km·h^{-1})	1.2~2.8

2 关键结构设计与动力学理论分析

2.1 田鼠前足爪趾内轮廓特征曲线提取

通过逆向工程方法获得田鼠前肢爪趾(图 3)点云数据,利用描点法在 ScanIt 软件中采集爪趾轮廓坐标数据点[16],最后将坐标值导入到数据处理软件 Matlab 中进行量化分析,结果为

$$y = 1.169\times10^{-8}x^4 - 1.529\times10^{-5}x^3 + 0.0085x^2 - 2.5564x + 0.0873 \quad (1)$$

拟合曲线方程决定系数 $R^2 = 0.9991$,表明拟合曲线接近于田鼠前爪趾轮廓,能够准确描述动物爪趾轮廓曲线特征。



图 3 田鼠爪趾内轮廓曲线

Fig. 3 Inner contour curve of vole's claw

2.2 弹性多趾揉搓辊组结构设计

弹性多趾揉搓辊组由 5 个单辊组成,相邻单辊之间通过同步链条连接,作业时,所有单辊的转动速度、方向均相同。单辊由辊轴和仿生揉搓趾组成,为避免作业时相邻单辊间互相干涉,设定相邻单辊上的仿生揉搓趾交错排列,为保证百合鳞茎能够落入特定的揉搓去土区域,结合百合鳞茎基本尺寸,设定相邻仿生揉搓趾之间间距 T 为 60 mm,仿生揉搓趾趾宽 b 为 20 mm,相邻两辊轴之间距离 l 为 120 mm,如图 4 所示。同时,为提高作业过程中百合鳞茎明茎率,根据田鼠前足爪趾内轮廓特征,将其内轮廓曲线应用于揉搓趾面上,并把背面作为工作曲线,如图 5(L 为仿生揉搓趾长)所示。

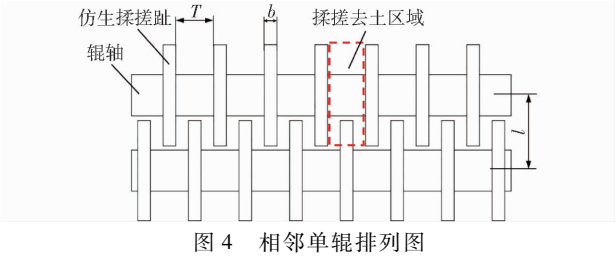


图 4 相邻单辊排列图

Fig. 4 Diagram of arrangement of adjacent single roller

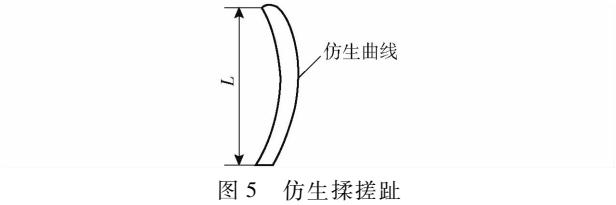


图 5 仿生揉搓趾

Fig. 5 Bionic rubbing toe

查阅文献[6,9]得到,根茎作物在收获过程中

与刚性材料发生摩擦碰撞是其致损的主要原因。聚氨酯材料具有弹性好、强度高等优点，可为弹性多趾揉搓辊组与百合鳞茎间的“揉搓”作用提供足够的支持力与摩擦力。因此，将聚氨酯材料作为弹性多趾揉搓辊组与百合鳞茎接触的主体材料（图 6），以起到缓冲作用，从而极大程度上降低百合鳞茎损伤。

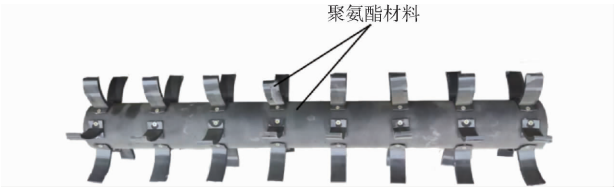


图 6　弹性多趾揉搓辊实物图

Fig. 6　Physical diagram of elastic multi-toe rubbing roller

2.3　动力学理论分析

根据百合鳞茎采收要求，通过分析弹性多趾揉搓辊组与百合鳞茎间的互作用关系，建立百合鳞茎在弹性多趾揉搓辊组上的动力学微分方程，以获得影响百合鳞茎受力及运动情况的主要因素。

如图 7 所示，以弹性多趾揉搓辊回转中心为原点 O，沿轴向方向为 x 轴、径向方向为 y 轴、垂直于地表方向为 z 轴。对单个百合鳞茎 M 进行运动学和动力学分析，百合鳞茎 M 在运动过程中受到重力 G、牵连力 F_{le}、科氏力 F_{lc}、摩擦力 F_f、支持力 F_n 共同作用，ω 为辊轴转速。

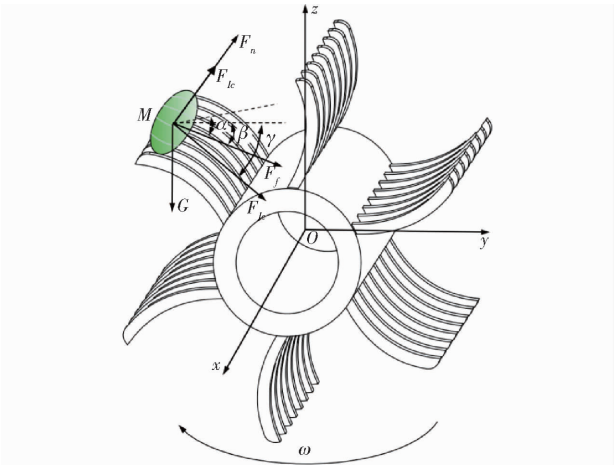


图 7　百合鳞茎受力图

Fig. 7　Force diagram of lily bulb

重力 G 沿 x、y、z 方向分力为

$$\begin{cases} G_x = 0 \\ G_y = 0 \\ G_z = G \end{cases} \tag{2}$$

牵连力 F_{le} 沿 x、y、z 方向分力为

$$\begin{cases} F_{lex} = 0 \\ F_{ley} = m\omega^2(r_1 + L)\cos\gamma \\ F_{lez} = m\omega^2(r_1 + L)\sin\gamma \end{cases} \tag{3}$$

式中　γ——牵连力 F_{le} 与 y 轴夹角，(°)

r_1——辊轴半径，mm

科氏力 F_{lc} 沿 x、y、z 方向分力为

$$\begin{cases} F_{lcx} = 2m\omega v_r \sin\beta\sin\alpha \\ F_{lcy} = 2m\omega v_r \sin\beta\cos\alpha \\ F_{lcz} = 2m\omega v_r \cos\beta \end{cases} \tag{4}$$

式中　α——摩擦力 F_f 与支持力 F_n 构成平面与 yoz 平面夹角，(°)

β——摩擦力 F_f 与 xoy 平面夹角，(°)

v_r——百合鳞茎与揉搓趾的相对速度，mm/s

支持力 F_n 沿 x、y、z 方向分力为

$$\begin{cases} F_n \geqslant (G + F_{lez})\cos\beta + F_{ley}\cos\alpha\sin\beta - F_{lc} = \\ \quad [G + m\omega^2(r_1 + L)\sin\gamma]\cos\beta + \\ \quad m\omega^2(r_1 + L)\cos\gamma\cos\alpha\sin\beta - 2m\omega v_r \\ F_{nx} = F_n \sin\beta\sin\alpha \\ F_{ny} = F_n \sin\beta\cos\alpha \\ F_{ny} = F_n \cos\beta \end{cases} \tag{5}$$

摩擦力 F_f 沿 x、y、z 方向分力为

$$\begin{cases} F_f = fF_n \\ F_{fx} = F_f \cos\beta\sin\alpha \\ F_{fy} = F_f \cos\beta\cos\alpha \\ F_{fz} = F_f \sin\beta \end{cases} \tag{6}$$

式中　f——百合鳞茎与仿生揉搓趾间的摩擦因数

联立式(2)～(6)，建立百合鳞茎与仿生揉搓趾相互作用过程中所受合力与百合鳞茎运动位移的二阶偏导动力学微分方程

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = F_{nx} + F_{fx} + F_{lcx} \\ m\dfrac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} = F_{ny} + F_{fy} + F_{ley} + F_{lcy} \\ m\dfrac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2} = F_{nz} + F_{fz} - F_{lez} + F_{lcz} - G_z \end{cases} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{F}_M = m\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t^2} + m\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{y}}{\mathrm{d}t^2} + m\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{z}}{\mathrm{d}t^2} = m\boldsymbol{a}_r \tag{8}$$

式中　$\boldsymbol{F}_M$——百合鳞茎所受合力，N

$\boldsymbol{a}_r$——百合鳞茎在仿生揉搓趾上被抛出时的相对加速度，mm/s^2

对百合鳞茎运动规律进行分析，如图 8 所示，得到百合鳞茎被抛出时的瞬时速度 v_a 为

$$\boldsymbol{v}_a = \boldsymbol{v}_x + \boldsymbol{v}_y + \boldsymbol{v}_z \tag{9}$$

其中

$$\begin{cases} v_x = v_{ex} + v_{rx} = v_r\cos\beta\sin\alpha \\ v_y = v_{ey} + v_{ry} = (r_1 + L)\omega\sin\gamma + v_r\cos\beta\cos\alpha \\ v_z = v_{ez} + v_{rz} = (r_1 + L)\omega\cos\gamma + v_r\sin\beta \end{cases} \tag{10}$$

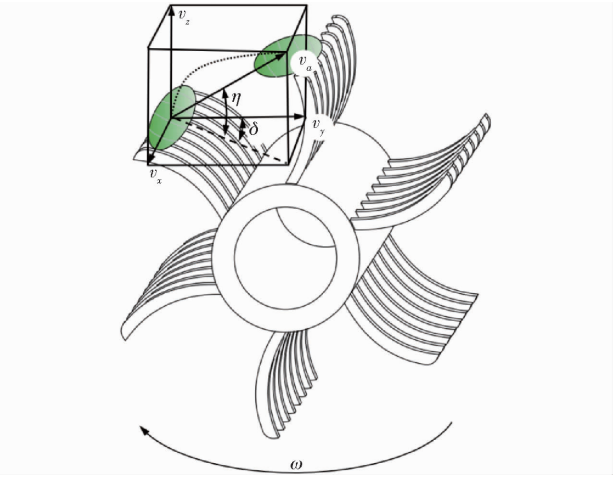


图 8 百合鳞茎被抛出示意图

Fig. 8 Schematic of lily bulb being thrown out

图中 η 为 v_a 与 xoy 平面夹角,(°);δ 为 v_a 在 xoy 平面投影与 y 轴方向夹角,(°)。

通过分析可得,百合鳞茎被抛出时合力 F_M 和瞬时速度 v_a 由辊轴半径 r_1、转速 ω、揉搓趾长 L、夹角 α 和 β 等因素决定;同时为使弹性多趾揉搓辊组与百合鳞茎充分摩擦,应保证百合鳞茎能够落入揉搓去土区域,因而弹性多趾揉搓辊单周趾数 N 对整体作业效果也具有重要影响。根据实际机具结构,设置辊轴半径 r_1 为 32.5 mm,夹角 α 和 β 与田鼠爪趾曲线弧度保持一致。为避免揉搓趾长过长会造成漏茎问题,根据百合鳞茎尺寸,同时结合聚氨酯材料的柔韧特性,设 L 为 40 ~ 60 mm,弹性多趾揉搓辊单周趾数 N 为 4 ~ 8,设辊轴转速 ω 为 40 ~ 60 r/min。

揉搓时去土除杂过程受力分析如图 9 所示,当百合鳞茎位于揉搓去土区域内时,以顺时针方向为正向进行转矩分析可得

$$\begin{cases} M_x = -F_h l_{hx}(\sin\theta_1 + \cos\theta_1\cos\theta_2) - \\ \qquad F_q l_{qx}(\cos\Phi_1\cos\Phi_2 + \sin\Phi_1) \\ M_y = F_h l_{hy}(\sin\theta_1 - \cos\theta_1\sin\theta_2) + \\ \qquad F_q l_{qy}(\sin\Phi_1 - \cos\Phi_1\sin\Phi_2) \\ M_z = -F_h l_{hz}\cos\theta_1 - F_q l_{qz}\cos\Phi_1 \end{cases} \tag{11}$$

$$|M| > 0 \tag{12}$$

式中 M_x、M_y、M_z——百合鳞茎在 x、y、z 方向受到的转矩,N·m

l_{qx}、l_{qy}、l_{qz}——前一个弹性多趾揉搓辊与百合鳞茎接触点到百合鳞茎质心点距离在 x、y、z 轴上投影,mm

l_{hx}、l_{hy}、l_{hz}——后一个弹性多趾揉搓辊与百合鳞茎接触点到百合鳞茎质心点距离在 x、y、z 轴上投影,mm

F_q——前一个弹性多趾揉搓辊对百合鳞茎的合力,N

F_h——后一个弹性多趾揉搓辊对百合鳞茎的合力,N

Φ_1——F_q 与水平面夹角,(°)

Φ_2——F_q 水平面投影与 y 轴夹角,(°)

θ_1——F_h 与水平面夹角,(°)

θ_2——F_h 水平面投影与 y 轴夹角,(°)

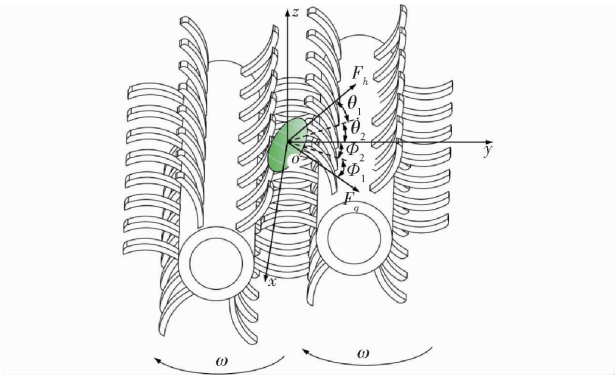


图 9 去土除杂过程受力分析

Fig. 9 Force analysis of impurity removal process

通过分析可知,仿生揉搓趾对百合鳞茎造成的各种作用力,均对百合鳞茎造成转矩,使百合鳞茎进行反转,通过“揉搓”作用,使粘附在百合鳞茎表面的土壤脱落,脱落下来的土壤,又在仿生揉搓趾作用下分解成细小颗粒,透过弹性多趾揉搓辊组之间的缝隙落回地面,如图 10 所示。

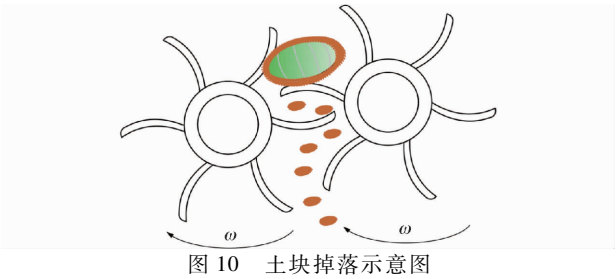


图 10 土块掉落示意图

Fig. 10 Schematic of fall of dirt blocks

3 弹性多趾揉搓辊组-土壤-百合鳞茎互作用仿真试验

为分析在输送分离过程中弹性多趾揉搓辊组的茎土分离效果,运用离散元方法[19-21],在 EDEM 2022 软件将土壤与百合鳞茎用 bond 键连接,通过分析不同条件下试验前后 bond 键断裂及百合鳞茎受力情况,来获取最优参数组合。

3.1 仿真模型建立

3.1.1 土壤-百合鳞茎粘结模型建立

土壤与百合鳞茎之间的粘结主要是表皮的粘结,根据其粘结特性与土壤自身的粘附特性,选择 Hertz - Mindlin with Bonding V2 模型为土壤-百合鳞茎的离散元复合体模型,模型中的微观各项参数可通过参考文献得出。参考根茎作物与土壤粘结模型

相关参数设置[22-25]可得，土壤-百合鳞茎法向与切向粘结刚度为 5×10^5 N/m、临界法向与切向应力为 3.1×10^6 Pa，粘结半径为 3 mm，恢复系数、静摩擦因数、动摩擦因数分别为 0.11、0.54、0.23。此外，通过对种植土壤取样及试验测定得到土壤密度、泊松比分别为 1 300 kg/m^3、0.28，土壤颗粒间恢复系数、静摩擦因数、动摩擦因数参照文献[26-27]得到，分别为 0.14、0.56、0.27，法向与切向粘结刚度为 5.3×10^7 N/m、临界法向与切向应力分别为 1.1×10^5 Pa，粘结半径为 3 mm，如表 2 所示。

表 2　表面粘结接触参数

Tab. 2　Surface bond contact parameters

参数	土壤-百合鳞茎	土壤-土壤
单位面积法向刚度/(N·m^{-1})	5×10^5	5.3×10^7
单位面积切向刚度/(N·m^{-1})	5×10^5	5.3×10^7
临界法向应力/Pa	3.1×10^6	1.1×10^5
临界切向应力/Pa	3.1×10^6	1.1×10^5
粘结半径/mm	3	3
碰撞恢复系数	0.11	0.14
静摩擦因数	0.54	0.56
动摩擦因数	0.23	0.27

百合鳞茎采用多球模型，并按照前期测得的百合鳞茎平均尺寸建立模型，其多球排列位置坐标如表 3 所示。为探究弹性多趾揉搓辊组对百合鳞茎表层粘结土壤的剥离效果，设置土壤颗半径为 2 mm，添加 200 个 bond 键连接百合鳞茎，以建立土壤-百合鳞茎粘结模型，如图 11 所示。

表 3　百合鳞茎位置坐标

Tab. 3　Position coordinates of lily bulb　mm

序号	x 坐标	y 坐标	z 坐标	半径
1	10	4	0	30
2	10	-4	0	30
3	-10	4	0	30
4	-10	-4	0	30
5	0	8	0	30
6	0	-8	0	30

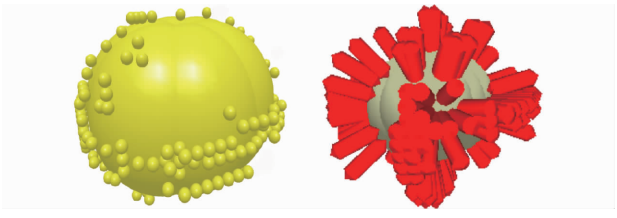


图 11　土壤-百合鳞茎粘结模型

Fig. 11　Bonding model of compound of lily bulb and soil

3.1.2　几何模型建立

使用 Solidworks 绘图软件绘制弹性多趾揉搓辊组的三维图，并保存成 .step 格式，导入到 EDEM 软件中进行仿真试验。设置弹性多趾揉搓辊组与土壤-百合鳞茎复合体的接触模型为 Hertz Mindlin (no slip)模型，其中相关基本特性参数如表 4 所示。颗粒工厂设置在弹性多趾揉搓辊组前上方，距离第 1 辊上方 100 mm，试验每组共生成 10 个土壤-百合鳞茎粘结复合体、3 个土块，生成的土壤-百合鳞茎粘结模型及土块不断掉落在辊组上，并随弹性多趾揉搓辊组滚动而受力向后运移，每组试验重复试验 3 次，每次总仿真时长设置为 2.5 s，如图 12 所示。

表 4　仿真参数

Tab. 4　Simulation parameters

参数	数值
土壤密度/(kg·m^{-3})	1 300
土壤泊松比	0.28
土壤剪切模量/Pa	1.01×10^6
土壤与辊恢复系数	0.16
土壤与辊静摩擦因数	0.55
土壤与辊动摩擦因数	0.39
百合鳞茎密度/(kg·m^{-3})	1 090
百合鳞茎泊松比	0.42
百合鳞茎剪切模量/Pa	1.85×10^6
百合鳞茎间恢复系数	0.23
百合鳞茎间静摩擦因数	0.38
百合鳞茎间动摩擦因数	0.29
百合鳞茎与辊恢复系数	0.32
百合鳞茎与辊静摩擦因数	0.50
百合鳞茎与辊动摩擦因数	0.42
聚氨酯泊松比	0.449
聚氨酯密度/(kg·m^{-3})	1 200
聚氨酯剪切模量/Pa	1.157×10^6

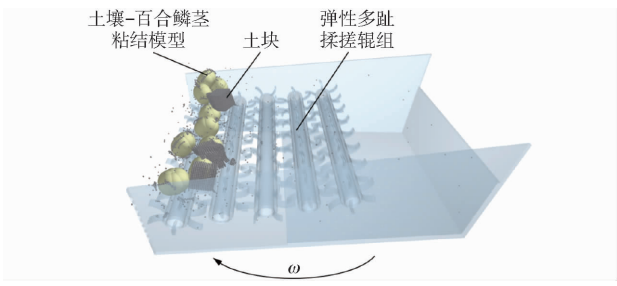


图 12　仿真模型

Fig. 12　Diagram of simulation model

3.2　仿真过程参数设置

根据弹性多趾揉搓辊组与百合鳞茎间的动力学理论分析得到，揉搓趾长 L、辊轴转速 ω 和单周趾数 N 对百合鳞茎受力及运动情况具有重要影响，因此以其为试验因素，运用 Box-Behnken 中心组合设计方法，百合鳞茎明茎率 Y_1、最大碰撞力 Y_2 作为评价指标，设计三因素三水平试验，其因素编码如表 5 所示。

表 5 试验因素编码

Tab. 5 Test factors and levels

编码	因素		
	揉搓趾长/mm	辊轴转速/(r·min^{-1})	单周趾数
-1	40	40	4
0	50	50	6
1	60	60	8

3.3 试验指标

3.3.1 明茎率

在弹性多趾揉搓辊组的作用下,土壤-百合鳞茎的 bond 键不断发生断裂,通过分析 bond 键断裂情况来判断作业后茎-土分离效果。根据根茎类中药材茎土分离装置的评价标准[28],计算百合鳞茎明茎率 Y_1,计算式为

$$Y_1 = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \tag{13}$$

式中 m_1——作业后所有百合鳞茎与粘附土壤的总质量,kg

m_2——作业后表面无粘附土壤的百合鳞茎总质量,kg

仿真结束后,通过 EDEM 后处理导出 m_1 和 m_2,并基于式(13)求得百合鳞茎明茎率。

3.3.2 最大碰撞力

在茎-土分离过程中,根茎与输送分离装置间的碰撞是导致根茎受损的主要原因,根据文献[6,9,29]可知,最大碰撞力已成为是衡量和预测根茎碰撞致损及装置作业性能的重要指标,当碰撞力越大,越容易导致根茎表面摩擦褐变、破裂、内部组织损伤等,从而影响其经济价值。百合鳞茎受到弹性多趾揉搓辊组的碰撞力可通过 EDEM 后处理获得,通过导出仿真过程中百合鳞茎受力随时间变化曲线,得到每组试验的最大碰撞力 Y_2,如图 13 所示。

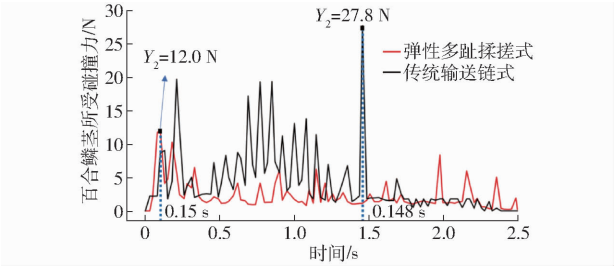


图 13 百合鳞茎所受碰撞力随时间变化曲线

Fig. 13 Variation curves of lily bulb force with time

3.4 仿真结果与方差分析

试验方案及结果如表 6 所示,A、B、C 为编码,建立回归模型,拟合正交试验数据。百合鳞茎明茎率方差分析如表 7 所示,所受最大碰撞力方差分析如表 8 所示,并进行显著性检验。

表 6 试验方案与结果

Tab. 6 Test protocol and result

试验序号	因素			明茎率/%	最大碰撞力/N
	A	B	C		
1	-1	0	-1	96.500	57.94
2	-1	-1	0	95.500	12.08
3	-1	1	0	96.375	14.20
4	-1	0	1	95.275	14.32
5	0	1	-1	97.125	64.34
6	0	0	0	96.950	10.80
7	0	0	0	96.950	11.20
8	0	-1	-1	97.350	65.20
9	0	0	0	97.125	8.80
10	0	0	0	97.225	12.80
11	0	-1	1	95.750	16.67
12	0	0	0	96.950	11.20
13	0	1	1	96.600	13.80
14	1	-1	0	96.125	10.65
15	1	0	1	95.750	15.50
16	1	1	0	96.600	9.87
17	1	0	-1	97.625	63.50

表 7 明茎率二次多项式模型方差分析

Tab. 7 Analysis of variance for quadratic polynomial model of clear net ratio

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	7.29	9	0.809 8	17.68	0.000 50 **
A	0.750 3	1	0.750 3	16.38	0.004 90 **
B	0.487 6	1	0.487 6	10.65	0.001 38 **
C	3.41	1	3.41	74.51	<0.000 1 **
AB	0.040 0	1	0.040 0	0.8734	0.381 10
AC	0.105 6	1	0.105 6	2.31	0.172 60
BC	0.288 9	1	0.288 9	6.31	0.040 30 *
A^2	1.80	1	1.80	39.37	0.000 40 **
B^2	0.233 8	1	0.233 8	5.10	0.058 40
C^2	0.040 5	1	0.040 5	0.885 2	0.378 10
残差	0.320 6	7	0.045 8		
失拟项	0.254 8	3	0.084 9	5.17	0.073 20
纯误差	0.065 7	4	0.016 4		
总和	7.61	16			

注:** 表示极显著($P<0.01$),* 表示显著($0.01\leqslant P<0.05$),下同。

由表 7、8 可知,回归模型 P 均小于 0.01,表明各评价指标拟合效果极显著;失拟项 P 均大于 0.05,不显著,表明方程模拟效果较好,试验因素对百合鳞茎明茎率影响从大到小依次为单周趾数、揉搓趾长、辊轴转速,对最大碰撞力的影响从大到小为单周趾数、辊轴转速、揉搓趾长;两个模型决定系数 R^2 分别为 0.957 9、0.995 1,接近于 1,表明拟合性可靠。

通过 Design-Expert 13 得到百合鳞茎明茎率多元二次回归方程为

表 8　最大碰撞力二次多项式模型方差分析

Tab. 8　Analysis of variance for quadratic polynomial model of clear net ratio

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	7 833. 38	9	870. 38	157. 15	<0. 000 1 **
A	0. 120 1	1	0. 120 1	0. 021 7	0. 887 1
B	0. 714 0	1	0. 714 0	0. 128 9	0. 730 1
C	4 545. 33	1	4 545. 33	820. 67	<0. 000 1 **
AB	2. 10	1	2. 10	0. 379 6	0. 557 3
AC	4. 80	1	4. 80	0. 865 9	0. 383 1
BC	1. 01	1	1. 01	0. 182 4	0. 682 2
A^2	1. 43	1	1. 43	0. 259 1	0. 626 4
B^2	10. 83	1	10. 83	1. 96	0. 204 7
C^2	3 235. 07	1	3 235. 07	584. 10	<0. 000 1 **
残差	38. 77	7	5. 54		
失拟项	29. 68	3	9. 89	4. 35	0. 094 6
纯误差	9. 09	4	2. 27		
总和	130. 41	16			

$$Y_1 = 97.04 + 0.306\,2A + 0.246\,9B - 0.653\,1C - 0.100\,0AB - 0.162\,5AC + 0.268\,7BC - 0.654\,4A^2 - 0.253\,6B^2 - 0.098\,1C^2 \quad (14)$$

百合鳞茎所受最大碰撞力多元二次回归方程为

$$Y_2 = 10.68 + 0.122\,5A - 0.298\,8B - 23.84C - 0.725\,0AB - 1.10AC - 0.502\,5BC - 0.583\,8A^2 + 1.60B^2 + 27.72C^2 \quad (15)$$

3.5　响应面分析

根据响应面(图 14)可知，单周趾数对百合鳞茎明茎率和最大碰撞力的影响最为显著，当单周趾数为 4 时，明茎率较高、最大碰撞力为最大值；单周趾数增加至 6 时，明茎率较高、最大碰撞力最低；单周趾数增加至 8 时，明茎率较低、最大碰撞力处在中间值；这是因为当单周趾数为 8 时，每两个仿生揉搓趾间夹角较小，仅有趾端对其进行揉搓作用，从而不能充分发挥仿生揉搓作用，而单周趾数为 4 时，夹角太大，有多个百合鳞茎挤入两趾之间，相互碰撞较为严重。此外，随着辊轴转速提升，明茎率呈先提高后降低趋势，而最大碰撞力呈先降低后升高趋势；随着揉搓趾长增大，明茎率呈先提高后降低、最大碰撞力呈先降低后升高趋势。

3.6　参数优化分析

利用 Design-Expert 13 软件中的参数优化模块进行优化构建目标函数以及约束条件

$$\begin{cases} \max Y_1(A,B,C) \\ \min Y_2(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

优化后参数组合，揉搓趾长 L 为 52 mm、辊轴转速 ω 为 54 r/min、单周趾数 N 为 6，该参数组合下仿真试验百合鳞茎明茎率 Y_1 为 97. 25%，所受最大碰撞力 Y_2 为 12 N。

3.7　对比仿真试验

最优参数组合条件下，弹性多趾揉搓辊组与传统输送链式茎土分离装置进行对比试验，如图 15 所示。其中，传统输送链式茎土分离装置的仿真试验采用 EDEM－RecurDyn 耦合方法开展[6]，选择不同仿真时刻同一颗百合鳞茎与土壤的 bond 键断裂情况进行分析，并计算比较 2 种装置作用下百合鳞茎

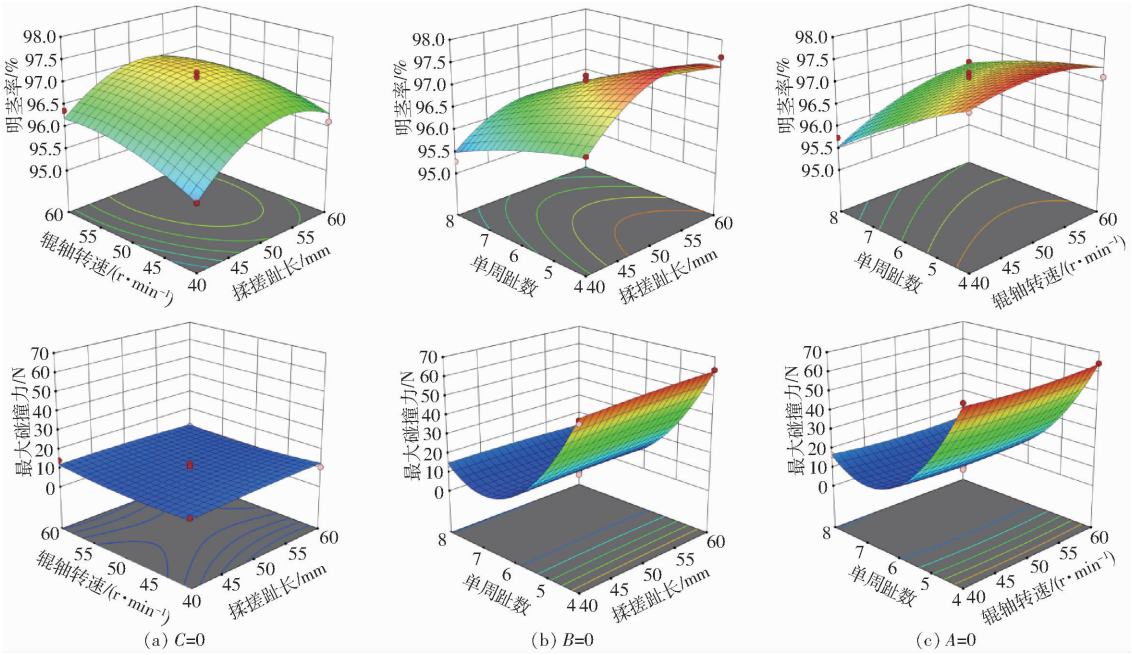


图 14　因素交互作用对评价指标影响的响应面

Fig. 14　Response surface of the interaction effects of factors on evaluation indicators

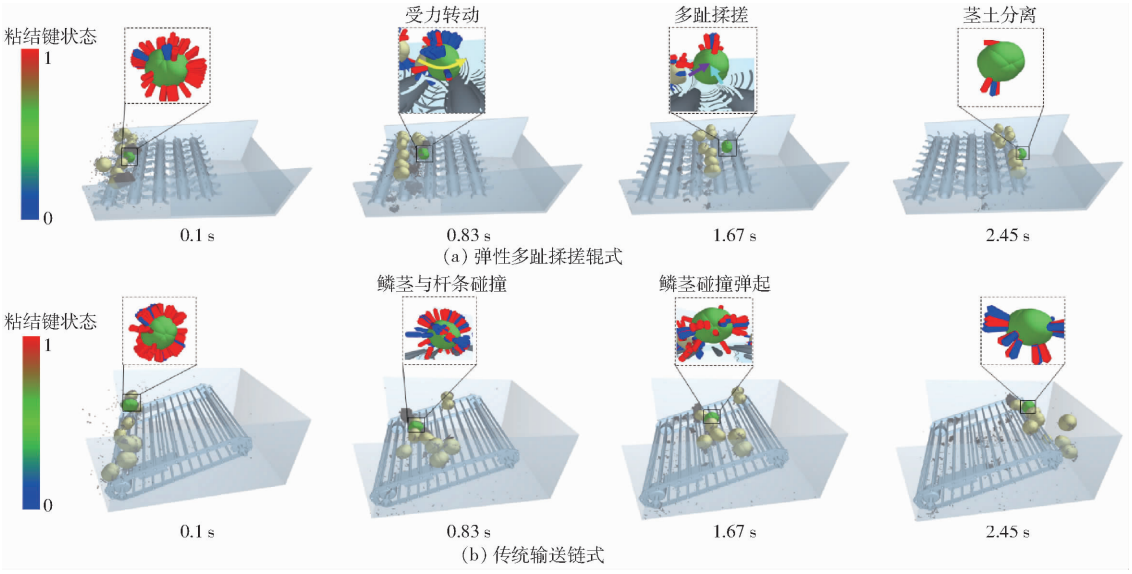


图 15 两种装置土壤-百合鳞茎 bond 键断裂情况对比

Fig. 15 Comparative of bond fracture between lily bulb and soil for two types of machines

明茎率 Y_1 和最大碰撞力 Y_2。

由图 15 可知,两种装置作用下土壤-百合鳞茎 bond 键粘结个数均随百合鳞茎向后移动而不断减少。其中,弹性多趾揉搓辊组作业过程中,百合鳞茎落入揉搓去土区域,前辊转动促使其仿生揉搓趾对鳞茎具有向下作用力,而后辊转动促使其仿生揉搓趾对鳞茎具有向上的作用力,在前后辊多个仿生揉搓趾的共同作用下形成转动扭矩(图 15a),以形成“揉搓”之势,使鳞茎表面与土壤的 bond 键断裂,进而随着弹性多趾揉搓辊组的持续转动,鳞茎后移并周期性进行此“揉搓”过程,以完成茎-土分离。而百合鳞茎在传统输送链式茎土分离装置上时,与刚性杆条相互碰撞、弹起,无法实现揉擦等作用,使其 bond 键断裂情况不显著,而碰撞较为严重(图 15b)。由图 16 可知,土壤-百合鳞茎 bond 键粘结个数随时间均呈先急剧后缓慢减少趋势,其中与弹性多趾揉搓式收获机相互作用的土壤-百合鳞茎 bond 键断裂情况最为显著,最终仅剩 55 个 bond 键未断裂。

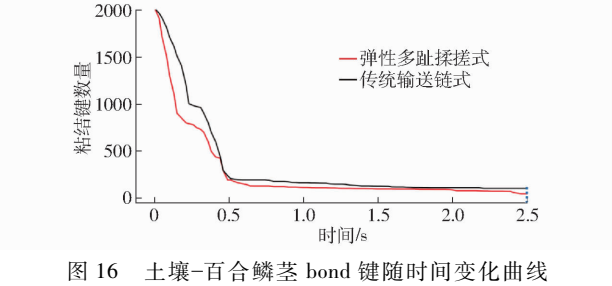


图 16 土壤-百合鳞茎 bond 键随时间变化曲线

Fig. 16 Curves of bond fracture between lily bulbs and soil change over time

根据式(13)和图 13 可知,传统输送链式茎土分离装置百合鳞茎明茎率 Y_1 为 94.45%、所受最大碰撞力 Y_2 为 27.8 N,与弹性多趾揉搓辊组仿真结果(3.6 节)相比,弹性多趾揉搓辊组具有较高明茎率和较低碰撞力,有利于实现百合鳞茎高效低损机械化收获目标。

4 田间试验验证

4.1 整机条件

弹性多趾揉搓式百合收获机如图 17 所示,其中弹性多趾揉搓辊的辊轴直径为 65 mm,仿生揉搓趾加工误差为 -0.2 ~ 0.2 mm,选择聚氨酯材料为二者主体材料;振动挖掘装置选用偏心齿轮传动机构实现挖掘铲上下振动;同步链轮采用 45 钢 4 分 08B 型号链轮、链条;同时为保证辊轴转速,使用 220 V 直流电机提供精准转速 54 r/min;并通过限深轮实现机具作业深度为 200 mm。其余设备包括凤拖 101 型手扶拖拉机、传统输送链式收获机、卷尺、秒表、电子秤、塑料箱等用于田间试验过程。



图 17 弹性多趾揉搓式百合收获机

Fig. 17 Elastic multi-toe rubbing lily harvester

4.2 试验条件

为了验证仿真模型优化后弹性多趾揉搓百合收获机作业效果,于 2025 年 4 月在陕西省杨凌区百合试验田进行试验,单垄垄高 220 mm,垄宽 700 mm,

垄间距 200 mm，每垄种植百合 2 行，如图 18 所示。

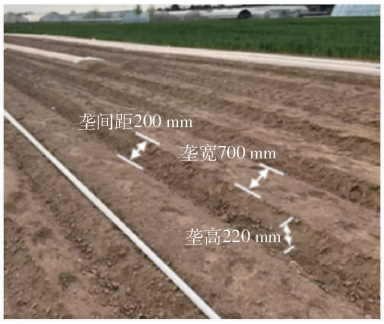


图 18　百合种植试验田

Fig. 18　Lily planting experimental field

4.3　试验方法

根据 NY/T3481—2019《根茎类中药材收获机质量评价技术规程》相关要求开展田间试验，设置机前进速度为 1.7 km/h，数据采集区收获长度为 40 m，选择最佳作业参数揉搓趾长 L 为 52 mm、辊轴转速 ω 为 54 r/min、单周趾数 N 为 6，对比弹性多趾揉搓式和传统输送链式收获机作业性能，如图 19 所示，将百合鳞茎明茎率、损伤率和所受最大碰撞力作为评价指标，每组试验重复 3 次并取平均值。每次试验结束后，百合鳞茎明茎率 Y_1 根据式(13)计算得到；机具作业过程中，百合鳞茎表面出现摩擦破皮、分裂、鳞片掉落等情况均属于损伤，百合鳞茎损伤率 e_1 计算式为

$$e_1 = \frac{m_3}{m_1} \times 100\% \tag{17}$$

式中　m_3——有明显破皮、分裂、鳞片掉落百合鳞茎质量，kg

百合鳞茎所受最大碰撞力 Y_2 由 TuberLog PTR500 型电子马铃薯测定，将电子马铃薯埋放于种植土壤中，观察和记录收获过程其与装置碰撞信息以获得数据。



(a) 弹性多趾揉搓式　　(b) 传统输送链式

图 19　两种机具田间试验

Fig. 19　Field trials of two types of machinery

4.4　结果分析

4.4.1　仿真结果与试验结果对比

田间试验结果如表 9 所示，其中弹性多趾揉搓式收获机百合鳞茎明茎率平均值为 95.80%、最大碰撞力为 15.2 N，仿真结果与其相比得到，明茎率相对误差为 1.51%，最大碰撞力相对误差为 21.05%；传统输送链式收获机的百合鳞茎明茎率平均值为 92.50%、最大碰撞力为 34.2 N，仿真结果与其相比得到，明茎率相对误差为 2.11%，最大碰撞力相对误差为 18.71%。可见，相对误差在合理范围内。

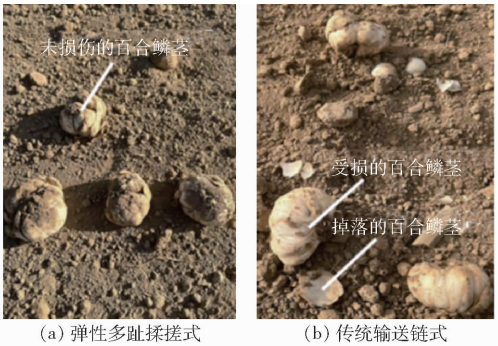
表 9　田间试验与仿真试验结果对比

Tab. 9　Comparison of results of field experiments and simulation tests

参数	弹性多趾揉搓式收获机			传统输送链式收获机		
	仿真值	试验值	相对误差/%	仿真值	试验值	相对误差/%
明茎率/%	97.25	95.80	1.51	94.45	92.50	2.11
最大碰撞力/N	12.00	15.20	21.05	27.80	34.20	18.71

4.4.2　田间作业性能

田间试验结果表明，弹性多趾揉搓式收获机百合鳞茎损伤率为 6.7%，而传统输送链式可达 19.7%，结合表 9 可知，弹性多趾揉搓式收获机相比于传统输送链式，其明茎率提高 3.3%，损伤率降低 13%。这是由于其仿生弹性揉搓趾与百合鳞茎充分接触摩擦，极大程度上提高了百合鳞茎去土分离效率、降低了百合鳞茎损伤率；而传统输送链式收获机通过其刚性杆条结构与百合鳞茎连续接触，导致百合鳞茎去土效果较差、损伤率较高。两种机具收获后落在地表百合鳞茎如图 20 所示，可以看出弹性多趾揉搓式收获机作业后的百合鳞茎损伤率较低，大多数为完整的百合鳞茎，而传统输送链式收获机收获后的百合鳞茎损伤较严重，有明显的破皮、分裂、鳞片掉落等情况，进一步增大了百合鳞茎损伤率。根据两种机具田间作业效果及百合鳞茎所受最大碰撞力情况可知，当 Y_2 增大时，百合鳞茎损伤率会不断提高。因此，设计的弹性多趾揉搓式百合收获机在满足根茎类中药材收获机质量评价相关要求的基础上，能够进一步提高百合鳞茎明茎率和降低其损伤率，且最大碰撞力相对较小，具有优异作业性能。



(a) 弹性多趾揉搓式　　(b) 传统输送链式

图 20　两种收获机作业后百合鳞茎损伤情况

Fig. 20　Damage of lily bulbs after two harvester operations

5 结论

(1)针对百合鳞茎机械化收获程度低且茎-土分离效果差、损伤严重等问题,运用仿生学原理,设计出一种弹性多趾揉搓辊组,通过理论分析,得到了影响百合鳞茎所受合力及运动情况的主要因素包括:揉搓趾长、辊轴转速、单周趾数。

(2)基于离散元方法,对弹性多趾揉搓辊组-土壤-百合鳞茎互作过程进行仿真分析,以百合鳞茎明茎率、所受最大碰撞力为评价指标,运用 Box - Behnken 中心组合设计方法得到最优参数组合:揉搓趾长 L 为 52 mm、辊轴转速 ω 为 54 r/min、单周趾数 N 为 6,在此组合参数条件下,百合鳞茎明茎率为 97.25%,最大碰撞力为 12 N。

(3)田间试验结果表明,最优参数条件下弹性多趾揉搓式收获机作业后的百合鳞茎明茎率仿真值与试验值相对误差 1.51%,最大碰撞力仿真值与试验值相对误差 21.05%;田间试验测得百合鳞茎明茎率为 95.80%、损伤率为 6.7%,比传统输送链式明茎率提高 3.3%,损伤率降低 13%。弹性多趾揉搓式百合收获机符合相关技术要求。

参 考 文 献

[1] 王泽宇, 刘小龙, 张华, 等. 根茎类中药材机械化收获现状及展望[J]. 林业机械与木工设备,2024,52(1):13 - 19.
WANG Zeyu, LIU Xiaolong, ZHANG Hua, et al. Current situation and prospect of mechanized harvesting of rhizome Chinese medicinal materials[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2024,52(1):13 - 19. (in Chinese)

[2] 方志超, 雷雨田, 代振维, 等. 湖南省块茎类中药材全程机械化现状与对策建议——以龙牙百合为例[J]. 农业工程与装备, 2020,47(2):20 - 26.
FANG Zhichao, LEI Yutian, DAI Zhenwei, et al. Present situation and countermeasures of whole-process mechanization of tuberous Chinese herbal medicines in Hunan Province[J]. Agricultural Engineering and Equipment, 2020,47(2):20 - 26. (in Chinese)

[3] 王虎存, 赵武云, 孙伟, 等. 西北旱作多模转向减粘碎土型马铃薯联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(4):252 - 263.
WANG Hucun, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Design and experiment of potato combine harvester based on multiple steering modes and anti adhesion soil fragmentation type[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4):252 - 263. (in Chinese)

[4] 程子文, 杨德秋, 刘萌萌, 等. 基于离散元仿真的马铃薯收获机集薯装袋过程研究[J]. 农业机械学报, 2024,55(增刊 2):62 - 74.
CHENG Ziwen, YANG Deqiu, LIU Mengmeng, et al. Bagging process of potato harvester based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(Supp. 2):62 - 74. (in Chinese)

[5] GUO R, LI Z, ZHAO P, et al. Design and operating parameter optimization of a harvester for efficient lily bulb cultivation[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2021,37(4):635 - 644.

[6] 李晓晖, 魏忠彩, 苏国梁, 等. 基于气固耦合的气筛式马铃薯清选装置参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 55(1): 96 - 108.
LI Xiaohui, WEI Zhongcai, SU Guoliang, et al. Parameter optimization and experiment of air-screen potato-stone cleaning device based on gas-solid coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023, 55(1):96 - 108. (in Chinese)

[7] 汪昕, 杨德秋, 刘萌萌, 等. 自走式马铃薯捡拾机捡拾装置参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 20 - 29.
WANG Xin, YANG Deqiu, LIU Mengmeng, et al. Parameter optimization and experiment of picking device of self-propelled potato collecting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp. 2):20 - 29. (in Chinese)

[8] CHEN M, LIU X, HU P, 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.

[9] 王兴欢, 魏忠彩,苏国梁,等. 马铃薯收获机扰动分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(4): 101 - 112.
WANG Xinghuan, WEI Zhongcai, SU Guoliang, et al. Design and experiment of simple harmonic disturbance separation device for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(4):101 - 112. (in Chinese)

[10] 郑嘉鑫, 王世顺, 马龙, 等. 三七茎叶采收机仿生切割刀片设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(8):117 - 126.
ZHENG Jiaxin, WANG Shishun, MA Long, et al. Design and experiment of bionic cutting blades for *Panax notoginseng* stem and leaf harvesting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(8):117 - 126. (in Chinese)

[11] YANG Y, TONG J, HUANG Y, et al. Biomimetic rotary tillage blade design for reduced torque and energy requirement[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2021,2021(1): 8573897.

[12] 王海翼，葛振伟，勇春明，等. 青贮玉米仿生切碎刀具优化与试验[J]. 农业工程学报，2025,41(1):87－97.
WANG Haiyi, GE Zhenwei, YONG Chunming, et al. Optimization and testing of the bionic chopping cutter for silage maize [J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(1): 87－97. (in Chinese)

[13] TANG Z, ZENG Z, WU S, et al. Optimizing soil resistance and disturbance of bionic furrow opener for paddy field based on badger claw using the CFD－DEM method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227:109549.

[14] 张鹏，郭志军，金鑫，等. 仿生变曲率深松铲柄减阻设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版)，2022,52(5):1174－1183.
ZHANG Peng, GUO Zhijun, JIN Xin, et al. Design and experiment of bionic subsoiler with variable variable curvature share shaft drag reduction[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022,52(5):1174－1183. (in Chinese)

[15] 郭志军，杜干，周志立，等. 土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析[J]. 农业机械学报,2011,42(6):47－52.
GUO Zhijun, DU Gan, ZHOU Zhili, et al. Actuality analysis of resistance-reducing properties on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):47－52. (in Chinese)

[16] 贾得顺. 仿生推土板准线变曲率规律及其减阻性能研究[D]. 洛阳:河南科技大学，2019.
JIA Deshun. Research on the variable curvature law of directrix and drag reduction of bionic bulldozing plates[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)

[17] 陈永，高晓勋，金鑫，等. 油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报，2023,54(12):58－69.
CHEN Yong, GAO Xiaoxun, JIN Xin, et al. Calibration and analysis of seeding parameters of *Cyperus esculentus* seeds based on discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(12):58－69. (in Chinese)

[18] 张喜瑞，胡旭航，刘俊孝，等. 香蕉秸秆离散元仿真粘结模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报，2023,54(5):121－130.
ZHANG Xirui, HU Xuhang, LIU Junxiao, et al. Calibration and verification of bonding parameters of banana straw simulation model based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(5): 121－130. (in Chinese)

[19] QUIST J, EVERTSSON C M. Cone crusher modelling and simulation using DEM[J]. Minerals Engineering, 2016, 85: 92－105.

[20] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010.

[21] 罗帅，袁巧霞，GOUDA Shaban，等. 基于 JKR 粘结模型的蚯蚓粪基质离散元法参数标定[J]. 农业机械学报，2018,49(4):343－350.
LUO Shuai, YUAN Qiaoxia, GOUDA Shaban, et al. Parameters calibration of vermicomposting nursery substrate with discrete element method based on JKR contact model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 343－350. (in Chinese)

[22] 李增玺. 百合收获机的设计与试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学，2020.
LI Zengxi. Design and experiment study of lily bulbs harvester[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[23] 代振维. 百合机械化收获果土分离作业机理研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2023.
DAI Zhenwei. Research on the separation mechanism of fruit and soil in mechanized harvesting of lily[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[24] 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)

[25] 曹成茂，刘忠滨，丁武阳，等. 宁前胡仿生挖掘铲设计与试验[J]. 农业机械学报，2023, 54(11):102－113.
CAO Chengmao, LIU Zhongbin, DING Wuyang, et al. Design and experiment of Ning-guo *Radix peucedani* bionic digging shovel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11):102－113. (in Chinese)

[26] 王宪良，胡红，王庆杰，等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报，2017,48(12):78－85.
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):78－85. (in Chinese)

[27] ZHAO P, GAO X, JU X, et al. Optimization of the front-mounted fertilizer pipe strip rotary tillage device by modeling the wide-seedbed characteristics and power consumption[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024(Pt.2):227.

[28] 农业农村部农业机械化管理司. 根茎类中药材收获机质量评价技术规程：NY/T 3481—2019[S]. 北京:中华人民共和国农业农村部,2019.

[29] 童威. 大蒜定量组合筛选机的设计与试验[D]. 杭州:浙江理工大学，2021.
TONG Wei. Design and experiment of garlic quantitative combination screening machine[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2021. (in Chinese)