doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.036

高转速弓形拨齿式藠头收获机输送分离装置设计与试验

方志超[1,2]　夏海峰[1]　邬　备[1,2]　代振维[3]　罗海峰[1]　胡　云[4]

(1.湖南农业大学机电工程学院,长沙 410128;2.湖南省现代农业装备工程技术研究中心,长沙 410128;
3.湖南机电职业技术学院,长沙 410151;4.长沙云升机电科技有限公司,长沙 410007)

摘要:针对藠头机械化收获作业中果土分离效果差、损伤率高和收集困难等问题,基于“高速梳刷-二次碎土-变隙碾压”收获原理,采用高转速弓形拨齿输送方式设计了藠头低损收获机输送分离装置。对弓形拨齿和挡网进行结构设计,对藠头输送过程开展了动力学和运动学分析,利用 EDEM 软件建立藠头和土壤的离散元模型,以果土分离率和收集入筐率为评价指标,对弓形拨齿转速、弓齿拨辊组提升角度和挡网倾角进行三因素三水平正交试验,结果表明,在弓形拨齿转速 294.40 r/min、弓齿拨辊组提升角度 31.65°和挡网倾角 24.36°条件下,果土分离率为 87.40%,收集入筐率为 90.23%。试制样机并进行了田间验证试验,结果表明:藠头破损率为 6.34%;果土分离率为 86.04%,与回归模型预测结果相差 1.36 个百分点,比现有藠头收获机的果土分离率提高了 6.08 个百分点;收集入筐率为 88.64%,与回归模型预测结果相差 1.83 个百分点,均满足设计要求。

关键词:藠头收获机;输送分离装置;弓形拨齿;果土分离

中图分类号:S225.7+9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0450-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Conveying and Separating Device of High-speed Arcuate Tine *Allium chinense* Harvester

FANG Zhichao[1,2]　XIA Haifeng[1]　WU Bei[1,2]　DAI Zhenwei[3]　LUO Haifeng[1]　HU Yun[4]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*
2. *Hunan Provincial Engineering Technology Research Center for Modern Agricultural Equipment*, *Changsha* 410128, *China*
3. *Hunan Mechanical and Electrical Polytechnic*, *Changsha* 410151, *China*
4. *Changsha Yunsheng Electromechanical Technology Co.*, *Ltd.*, *Changsha* 410007, *China*)

Abstract: Aiming to address the challenges of low soil-crop separation efficiency, high mechanical damage, and difficult collection encountered in the mechanized harvesting of *Allium chinense*, a conveying device for a low-damage *Allium chinense* harvester was designed based on the operational principle of “high-speed combing brushing, secondary soil crushing, and variable-gap rolling”. An arcuate tine high-speed conveying mechanism was employed to achieve gentle material handling. The structural parameters of the arcuate tine were optimized through kinematic and dynamic analyses of the conveying process. Discrete element models of *Allium chinense* bulbs and soil particles were established by using EDEM software, and a three-factor three-level orthogonal experiment was conducted to evaluate the effects of arcuate tine rotation speed, roller group elevation angle, and mesh cover inclination angle on soil-crop separation rate and collection rate into the basket. Results indicated that the optimal performance was achieved at an arcuate tine speed of 294.40 r/min, a roller elevation angle of 31.65°, and a mesh inclination of 24.36°, yielding a soil-crop separation rate of 87.40% and a collection rate into the basket of 90.23%. A prototype was fabricated and tested under field conditions. Field validation results showed that a damage rate of 6.34%, soil-crop separation rate of 86.04% (There was a difference of 1.36 percentage points between the actual result and the predicted value from the regression model), the developed system demonstrated a 6.08% enhancement in *Allium chinense* bulb-soil separation efficiency compared with conventional harvesting machinery. A collection rate into the basket of 88.64% (There was a difference of 1.83 percentage points between the actual result and the predicted

收稿日期:2025-03-08　修回日期:2025-04-15

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2024JJ5194)和湖南省 2023 年智能农机装备创新研发项目(HN202311)

作者简介:方志超(1987—),男,讲师,博士,主要从事智能农业装备设计制造研究,E-mail:fangzhichao@hunau.edu.cn

通信作者:邬备(1988—),男,讲师,博士,主要从事农业机械创新设计研究,E-mail:wubei@hunau.edu.cn

value from the regression model), all performance metrics met the design requirements. The research result can provide theoretical and technical insights for the development of efficient and low-damage *Allium chinense* harvesting equipment.

Key words: *Allium chinense* harvester; conveying and separating device; arcuate tine; soil-crop separation

0　引言

藠头为葱属多年生草本植物，呈长椭圆形，数枚聚生，外皮膜质，白色或带红色[1]。藠头种植需温湿环境，生长在排水良好沙性土壤中[2]，主要栽培在中国南方各省，收获期在夏季，大部分收获作业依靠人工，劳动强度大，作业效率低、收获成本高[3]。因此藠头收获机械化作业需求紧迫。

藠头一般位于地下 13 cm 左右，其根须发达，错综复杂，可达 25 ~ 30 cm，对于土壤的附着效果明显[4]，应研究机械收获如何去除其附着的土壤，达到良好果土分离的效果。近年来国内外学者对地下作物果土分离-拨辊输送技术进行了大量研究：张国忠等[5]设计一种荸荠收获机，采用正反旋弹簧并排布置的弹簧辊式泥果分离装置；杨然兵等[6]设计了一款由聚氨酯材料构成的左右螺旋对称式去土辊与可调节式光辊交替排列组合的马铃薯收获机辊组式输送分离装置；王相友等[7]设计了一种采用六齿拨轮和可伸缩多级辊组进行输送和薯土分离的装置；王相友等[8]设计了一种清选辊与光辊交替排列、两辊差速转动的清选装置；曲永波等[9]设计了一种拨辊推送式多级分离装置；柳亚峰等[10]设计了一种差速对辊拨刷式分离去土装置；吕金庆等[11]设计了一种除杂辊转动摩擦除杂的马铃薯料斗机除杂装置；国外 GRIMME 公司设计了一种柔性分离辊的多级除杂分离装置，可实现在多种土壤条件下收获作业[12]。专业性软件的仿真是当前探究果土分离和优化收获机分离装置的主要方法：杨德秋等[13]运用 DEM - MBD 耦合的方法对马铃薯在两级输送链交接处的运动过程及受力情况进行分析；王法安等[14]开展三七根土复合体输送分离作业联合仿真，验证了仿真模型的可靠性，明确了三七根土复合体输送分离规律；DAI 等[15]建立百合鳞茎的离散元模型，测量优化接触参数取值，为百合机械化收获的模拟试验提供参考；徐弘博等[16]采用离散元软件仿真优化方法对输送板的运动参数（方向角、振幅、频率）进行仿真分析得到最佳作业性能。根据相关软件仿真优化，利用现有拨辊输送分离技术研制了收获装置，可基本实现果土分离，但未能解决输送效率高和损伤率低的矛盾，无法适应藠头聚集成团且与土壤相互粘结的特性。

为解决藠头果土低损有效分离难题，基于“高速梳刷-二次碎土-变隙碾压”收获技术，采用高转速弓形拨齿输送方式设计一种藠头低损收获机输送分离装置，同时配套设计藠头收集装置实现藠头收集入筐功能。

1　总体结构和工作原理

1.1　总体结构

藠头收获机主要工作部件包括挖掘装置、输送提升碎土装置、收集入筐装置、机架和传动系统，如图 1 所示。挖掘装置由挖掘铲、支撑梁和固定筛等组成；输送提升碎土装置由弓形拨齿、六方轴、定位套筒、侧板、挡网、三点悬挂机架和传动系统等组成；收集入筐装置由导流齿、塑料挡网、底座、收集筐、挡帘安装支架、底座安装支架等组成。

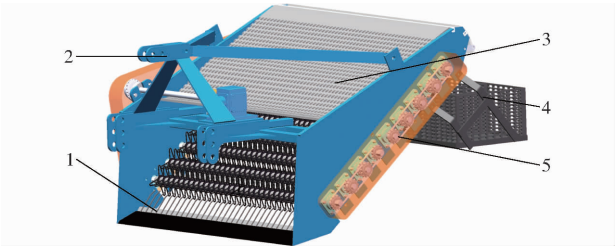


图 1　藠头收获机结构图

Fig. 1　Structure diagram of *Allium chinense* harvester

1. 挖掘装置　2. 机架　3. 输送分离装置　4. 收集入筐装置　5. 传动系统

1.2　工作原理和主要技术参数

藠头收获机使用三点悬挂装置，悬挂于拖拉机尾部，动力输出轴将动力通过联轴器传递给输送提升碎土装置。在工作时，通过拖拉机的液压系统使挖掘铲入土，将物料挖出至固定筛处，传递到输送提升碎土装置中；输送提升碎土装置由 9 组弓形拨齿辊组成，物料首先在高转速的作业中，通过弓齿之间的冲击梳刷破碎藠头表面黏附土块，使其从弓齿间隙中落回地面，完成藠头与土壤初步分离；藠头团同时被拆散成单个藠头或小块藠头团随着拨辊组向上向后输送，大倾角的拨辊使输送空间减小，从而实现与挡网进行碰撞搓擦二次去土；最后由收集入筐装置的导流齿和挡料板引导落入收集筐中。

主要技术参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 600×1 900×1 100
作业幅宽/mm	1 500
作业速度/(km·h^{-1})	5~10
提升角度/(°)	32
弓形拨齿转速/(r·min^{-1})	295
整机质量/kg	300
配套功率/kW	80

2 输送分离装置设计

设计的弓形拨齿式输送分离装置结构如图 2 所示,此装置中的拨辊组由弓形拨齿、六方轴、定位套筒组成。多个弓形拨齿安装在六方轴上,组成弓齿拨辊组,但又分为单、双数两种不同安装方式,轴上两弓形拨齿之间通过定位套筒控制空隙,每级弓齿拨辊通过链轮相连接,确保各级弓齿拨辊转速相同且位置固定。

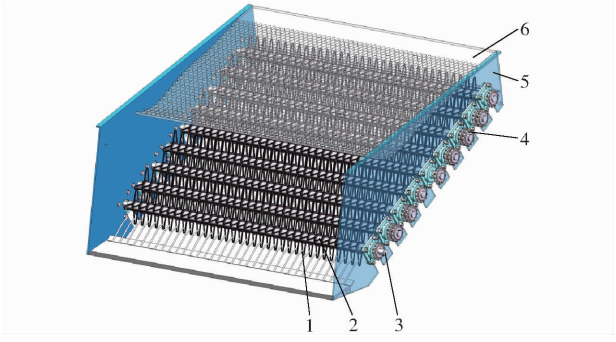


图 2 输送分离装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of conveying separation device

1. 弓形拨齿 2. 定位套筒 3. 六方轴 4. 链轮组 5. 侧板 6. 挡网

2.1 弓形拨齿结构设计

2.1.1 安装结构与间距

拨齿的间距和抛送辊中心距直接决定能否输送蕞头及分离土块[17],在不漏果的前提下实现落土,两弓形拨齿之间的间隙应由蕞头底端直径决定,确保间隙小于直径以实现有效分选,同时间隙不应过小,尽可能保证分离出来的土壤能顺利掉落,通过对蕞头形状参数统计,蕞头底端直径平均为 35 mm,综合分析确定安装在两弓形拨齿之间的隔套长度 T 为 40 mm,弓形拨齿齿尖与套筒的空隙 L 为 30 mm。拨辊组安装结构如图 3 所示。

2.1.2 弓齿齿数

蕞头在弓形拨齿的运动空间内需要实现最基本的向后输送效果,弓形拨齿齿尖线速度在水平方向的分量 v_x 与机具前进速度 v_m 满足 v_x/v_m 大于 1 时,果土混合物将有向后运动的速度与位移趋势,可保证

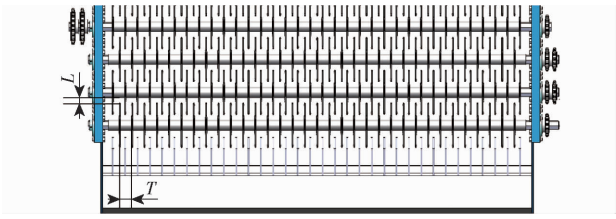


图 3 拨辊组安装结构图

Fig. 3 Installation structure diagram of roller sets

抛送辊组将果土混合物向后输送,此时抛送辊轮末端的运动轨迹将形成余摆线[18],弓形拨齿齿尖运动轨迹如图 4 所示。

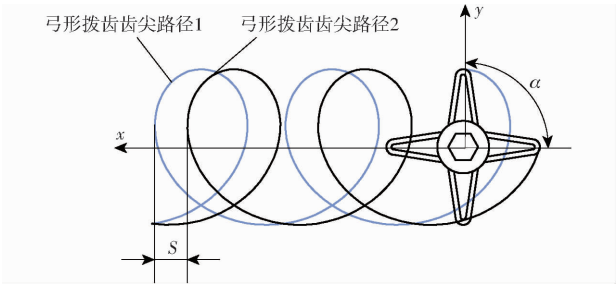


图 4 弓形拨齿齿尖运动轨迹

Fig. 4 Motion trajectory of tip on arcuate tooth

S 为两相邻弓形拨齿齿尖形成余摆带的间距,表达式为

$$S = X_1 - X_2 = \frac{D}{2}\cos(\omega t) - \frac{D}{2}\cos(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

式中 X_1、X_2——两相邻弓齿尖在 t 时的 X 轴坐标,mm

D——弓形拨齿直径,mm

ω——弓齿角速度,rad/s

t——时间,s

α——弓齿夹角,(°)

弓形拨齿的碎土作业效率需高于挖掘铲的物料输送量,已知蕞头为成行种植模式[19],通过田间采样测量得到蕞头种植行间距 S_H 均值为 50 mm,输送蕞头保持连续性所需的条件为

$$S_H \leqslant \frac{360}{\alpha} S \quad (2)$$

由式(1)、(2)可得弓齿夹角 α 需小于 97.32°,考虑加工制造工艺取范围内最小齿数,确定弓齿齿数为 4。

2.1.3 弓齿结构

蕞头在作业中与圆钢制成的弓齿进行碰撞碎土,接触面为弧形,不易损伤表皮,故使用圆钢制成齿形。根据设计要求,机具作业时,蕞头应在由弓形拨齿组成的 9 组拨辊轮上实现分离土壤和输送蕞头。在相邻的两弓形拨齿之间会形成一个区域,为持果碎土空间,如图 5 所示阴影区域,可实现对蕞头去土作业,并完成向后输送。通过对蕞头土壤粘结物

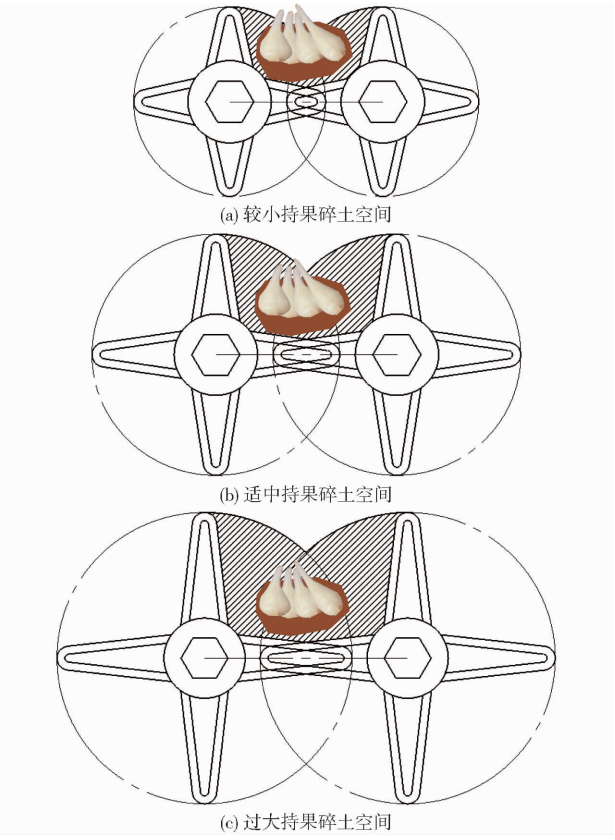


图 5　持果碎土空间对比

Fig. 5　Comparing fruit-holding and soil-crushing spaces

的形状尺寸统计得到持果碎土空间范围，同时满足蒜头的输送及去土，减少损伤，求得弓形拨齿基本参数。

弓形拨齿之间形成的持果碎土空间如图 5 所示，相邻弓形拨齿运动阴影面积为基本持果空间，两弓形拨齿相交形成的阴影面积为碎土空间，需要满足包裹蒜头的条件才能实现梳刷碎土作业。持果碎土空间过小导致果土分离效果差和细碎土壤无法掉落，如图 5a；持果碎土空间过大会导致蒜头随土壤从弓齿间隙掉落，增加功耗甚至产生挤压损坏，如图 5c。在蒜头输送过程中达到最佳去土效果需要满足：基本持果碎土空间体积 V_C 大于初始蒜头土壤混合物的体积 V_J。

如图 5b，基本持果碎土空间体积 V_C 为

$$V_C = \frac{\arccos\dfrac{4D}{\dfrac{D}{2}+\dfrac{d}{2}+L}}{360}\pi TD^2 - T\left(\frac{D}{2}+\frac{d}{2}+L\right)\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2-\left(\frac{d}{2}\right)^2} \tag{3}$$

式中　d——弓形拨齿安装圆盘直径，mm

经测量统计蒜头土壤粘结物体底端直径 D_J 为 82.2 ~ 115.9 mm，高 H 为 60 ~ 80 mm，如图 6。视为规则圆锥，其初始蒜头土壤粘结物体积 V_J 为

$$V_J = \frac{D_J^2}{6}\pi H \tag{4}$$



图 6　蒜头土壤粘结物

Fig. 6　Mixture of *Allium chinense* and clods

由式(3)、(4)计算得弓齿最小直径为 170 mm，最大直径 189 mm。根据实际加工制造取弓形拨齿直径 D 为 178 mm，安装盘直径 d 为 60 mm，齿尖夹角 γ 为 18°。最终确定弓形拨齿结构如图 7。

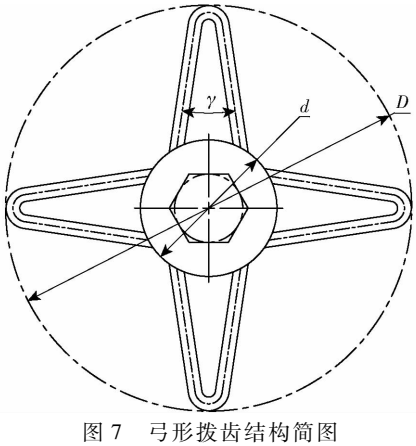


图 7　弓形拨齿结构简图

Fig. 7　Dimensional sketch of arcuate tooth

2.2　挡网设计

挡网与弓形拨齿输送辊共同组成输送分离部件，蒜头被弓形拨齿向后向上输送，挡网主要实现对蒜头输送过程中的限位，防止蒜头掉落飞出。挡网的安装位置也直接影响蒜头与网面的碰撞位置及在分离输送装置中滞留时间，进而影响果土分离效率。通过分析蒜头在输送分离装置中挡网作用下的运动轨迹，发现其与挡网碰撞后的运动特征受挡网网孔尺寸、与弓形拨齿间隙和倾角共同影响。

2.2.1　挡网网孔尺寸设计

将挡网与弓形拨齿输送辊所围成的间隙定义为输送空间。当蒜头团在弓形拨齿作业下分散成单个蒜头时，保证能保持在输送空间之中，需要挡网的网孔尺寸小于单个蒜头，通过对收获地区的单个蒜头尺寸调查，蒜头底端直径平均为 35 mm，则挡网上的网孔尺寸设置为 40 mm，孔距 45 mm，在挡网均匀排布[20]，既能保证蒜头不脱离输送空间，还可使作业人员观察到输送空间基本情况。

2.2.2 挡网间隙及倾角设计

挡网跟弓形拨齿之间的间隙需要满足蒜头正常的输送空间,间隙过大无法完成挡网对蒜头的二次碎土作业。如图 8 所示,末端弓形拨齿与挡网的最小间隙需满足单个蒜头通过性,不发生大量堆积导致蒜头挤压损坏。对蒜头三维尺寸测量及前期研究试验表明,间隔 S_T为 10 mm 时可保证顺畅落料入筐。

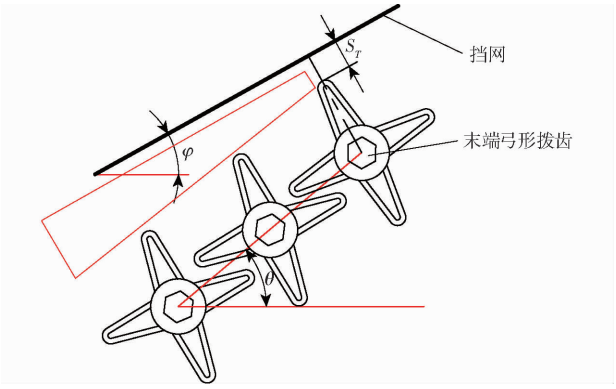


图 8 输送空间示意图

Fig. 8 Conveying space

输送空间中的间隙变化主要由弓齿拨辊组提升角度 θ 和挡网倾角 φ 决定,输送间隙在不断减小的同时,对蒜头的挤压不断增加,但不能影响末端通过性,需满足

$$\arcsin\frac{\left(S_T+\frac{D}{2}\right)\sin(90^\circ-\varphi)}{S_D}\leqslant\theta \tag{5}$$

式中 S_D——挡网总长,mm

将相关取值 $S_T=10$ mm、$D=178$ mm、$S_D=600$ mm 和弓齿拨辊组提升角度 θ 大于挡网倾角 φ 代入式中,解得弓齿拨辊组提升角度 θ 和挡网倾角 φ 关系为:$\cos\varphi\leqslant 6\sin\theta$。

3 蒜头输送运动学分析

对蒜头在输送提升碎土装置的作业运动过程分为前后两部分,首先由固定筛将蒜头与土壤的大块混合物输送到输送提升碎土装置前部分进行冲击挤压、梳刷破碎,对蒜头土壤大块混合物进行初步碎土,以及分离蒜头团使其变为单个蒜头或较小蒜头团,实现向上向后输送,进行与挡网碰撞第 2 阶段的碎土作业。作业示意图如图 9 所示。

3.1 弓齿输送动力学分析

第 1 阶段蒜头为聚集团状物,土壤包裹厚实,主要依靠交错排列的弓形拨齿挤压碰撞作用实现破碎,得到较小聚集团状物和单个蒜头,输送到下一级拨辊。蒜头土壤粘结物在弓齿作业过程如图 10 所示。

对蒜头土壤粘结物在弓形拨齿上的受力状况进

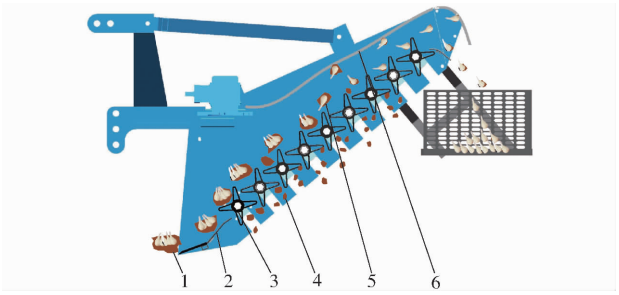


图 9 输送分离装置碎土作业示意图

Fig. 9 Schematic of soil crushing operation in conveying separation device

1. 蒜头土壤大块粘结物 2. 固定筛 3. 弓形拨齿 4. 分离的土块 5. 单个蒜头 6. 挡网

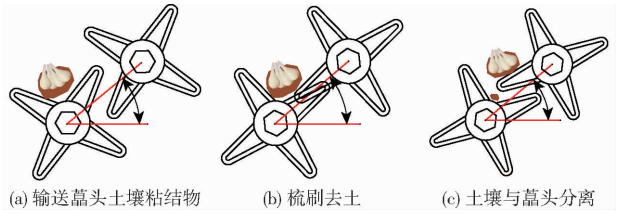


图 10 弓形拨齿梳刷去土过程分析

Fig. 10 Analysis of soil removal process using arcuate tooth combing and brushing method

行力学特性分析,如图 11 所示,当物料被输送到持果碎土空间时,其受到前后两拨齿组的夹持,此时蒜头团土壤混合物主要受到前拨齿组对它的反向拨动力、后拨齿组的正向拨动力和自身重力。

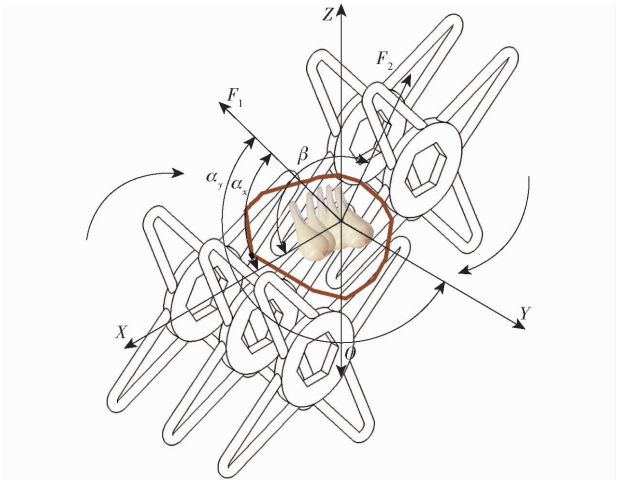


图 11 蒜头土壤粘结物受力分析

Fig. 11 Force analysis of mixture of *Allium chinense* and clods

为保证黏附在蒜头表面的大块土壤能被破碎,弓形拨齿组对黏附土壤的碰撞力需要大于土壤内部的粘结力[21],可对蒜头土壤混合物中点的力矩方程进行分析,有

$$\begin{cases}M_{xoz}=n_1F_1l_x\sin\alpha-n_2F_2l_x\sin(180-\beta)\\ M_{yoz}=n_1F_1l_y\cos\alpha-n_2F_2l_y\sin\beta\end{cases} \tag{6}$$

式中 n_1、n_2——与蒜头团接触的各组弓齿数量

F_1、F_2——与蒜头团接触的各组弓齿合力,N

M_{xoz}——蕞头团在 xoz 面受到的转矩

M_{yoz}——蕞头团在 yoz 面受到的转矩

α、β——F_1、F_2的投影夹角，(°)

l_x——蕞头团在弓齿接触点上受到的碰撞力投影到 xz 面上时与点 O 距离，mm

l_y——蕞头团在弓齿接触点上受到的碰撞力投影到 yz 面上时与点 O 距离，mm

弓形拨齿组撞击蕞头土壤粘结物初始接触时，弓形拨齿的动量可视为对土壤的冲击碰撞力，因此弓形拨齿对蕞头土壤粘结物的碰撞作用力表示为

$$F_b = 2m_b n^2 D\pi^2 \tag{7}$$

式中　F_b——弓形拨齿对蕞头土壤粘结物的作用力，N

m_b——弓形拨齿质量，kg

n——弓形拨齿转速，r/min

由式(6)、(7)分析可知，弓形拨齿梳刷去土方式为“揉搓”，去除表面土壤和弓齿面对蕞头土壤粘结物产生的冲击分离破碎，而主要影响破碎土块的因素包括弓形拨齿转速和弓齿拨辊组提升角度等。弓形拨齿冲击碰撞力大于土壤内部粘结力导致蕞头土壤粘结物上土块破碎脱落，前期对蕞头土壤粘结物的内部粘结力多次试验取平均值为 19.54 N，将已知的相关参数 m_b取 0.98 kg 和 D 取 178 mm，代入式(7)可得弓形拨齿转速 n 最小值为 194.42 r/min。

3.2　挡网碰撞动力学分析

前段弓形拨齿组将蕞头团组分散，自身提供的重力变小，高速弓形拨齿提供的碰撞力使单个蕞头能完成向上抛送，当挡网倾角小于弓齿拨辊组提升角度，阻碍了蕞头的提升，实现与挡网进行碰撞搓擦碎土，去除黏附表面土壤，实现二次碎土，并且随着蕞头的不断向后端输送，输送空间间隙减小，可发生碾压去除表层土壤[22]。在单个蕞头输送过程中，将拨齿组简化为平面，忽略蕞头在运动中所受空气阻力，其运动过程受力碰撞分析如图 12 所示。

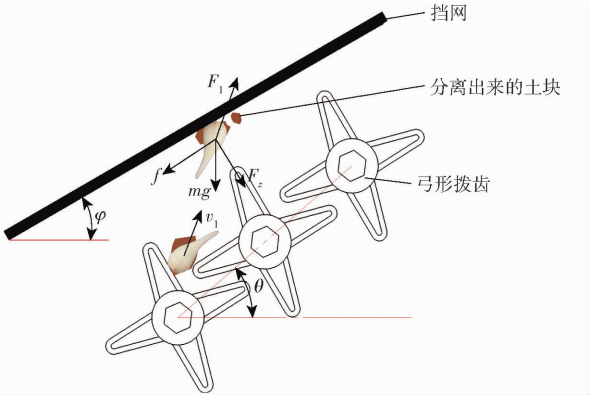


图 12　单个蕞头运动受力分析图

Fig. 12　Force analysis of single *Allium chinense* in motion

由莫尔-库伦理论可知，剪切应力是去除黏附表面土壤的主要作用力，计算公式为

$$\tau_i = \sigma\tan\varphi + C \tag{8}$$

式中　τ_i——土壤抗剪强度，kPa

σ——作用于土壤破坏面的法向应力，kPa

φ——土壤内摩擦角，(°)

C——土壤内聚力系数

剪切应力破坏土壤结构主要是克服土壤内部的粘结力，土壤粘结力 F_p为

$$F_p = \tau_i S \tag{9}$$

式中　S——土壤剪切面积，mm^2

经过模拟破碎分析可知，土壤剪切面基本与挡网平行，重力在挡网上的分力和所受摩擦力之和需大于土壤的粘结力，土壤才能与蕞头分离，即

$$m_c g\cos\varphi + \mu F_z > F_p \tag{10}$$

式中　m_c——土壤质量，g

μ——挡网与土壤的摩擦因数

F_z——挡网对蕞头的支撑力

蕞头与土壤分离的临界状态时可视为受力平衡。结合图 12 可求得整体受力平衡方程

$$mg\cos(90-\varphi) + F_z = F_3\cos(180-\theta-\varphi) \tag{11}$$

式中　F_3——蕞头对挡网的冲击力，N

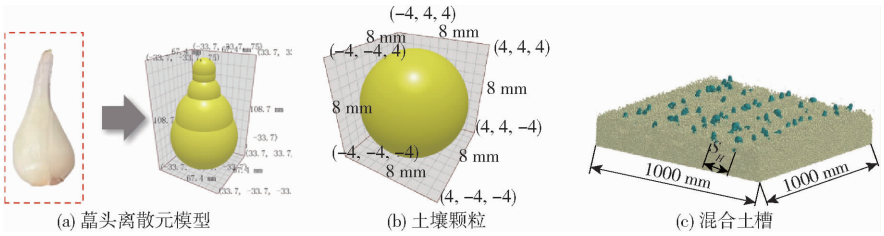
由上述公式分析得到蕞头与挡网进行搓擦分离黏附表面土壤的主要影响条件为挡网倾角、弓齿拨辊组提升角度和蕞头抛送初始速度等。

4　离散元仿真与试验

4.1　仿真模型建立

为了分析蕞头输送去土运动过程，采用离散元软件 EDEM 2022.2 模拟机具收获作业过程，对蕞头在输送提升装置输送过程进行仿真。运用扫描仪进行蕞头三维特征提取以及建模，便于分析在收获过程中其运动规律及力学特性，选取大小适中的蕞头模型导入 EDEM 进行填充和尺寸重构，得到长 43 ~ 52 mm、底部直径 30 ~ 40 mm、底部厚度 20 ~ 28 mm 的蕞头离散元模型，如图 13a 所示；分析田间初次试验过程中从挖掘装置输送至输送分离装置弓形拨齿组内的土壤尺寸，建立细土粒模型，半径为 4 mm 的球形颗粒如图 13b 所示；根据蕞头种植模式和农艺要求，建立长 × 宽 × 高分别为 1 000 mm × 1 000 mm × 200 mm 的行种蕞头种植土块离散元模型，如图 13c 所示，以行距 S_H为 50 mm 控制蕞头生成间隔，每行填充 25 个蕞头，埋入深度为 130 mm，与实际生长深度一致，其他空隙全部充满细土粒模型，静置后混合土槽总质量为 30 kg。

通过排水法测量蕞头密度，使用质构仪测量蕞



(a) 菖头离散元模型 (b) 土壤颗粒 (c) 混合土槽

图 13 离散元模型

Fig. 13 Discrete element models

头弹性模量与泊松比。通过环刀法测量菖头田土壤密度,使用摩擦系数测试仪测量菖头、土壤、弓形拨齿和挡网之间的动静摩擦因数,采用自由落体方式测量菖头-菖头、菖头-钢之间的碰撞恢复系数[23-25]。并结合文献[26-28]确定仿真参数,如表2、3所示。使用 Hertz-mindlin with JKR 模型表征菖头与土壤及土壤内部的粘结力,分别为9、15 J/m^3。

表 2 材料本征参数

Tab. 2 Material intrinsic parameters

材料	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/MPa	泊松比
菖头	1 186	6.43	0.28
土壤	1 834	61	0.37
钢	7 850	2.02×10^5	0.31

表 3 接触参数

Tab. 3 Contact parameters

接触类别	静摩擦因数	动摩擦因数	碰撞恢复系数
菖头-菖头	0.69	0.57	0.32
菖头-钢	0.61	0.48	0.57
菖头-土壤	0.54	0.36	0.19
土壤-钢	0.72	0.11	0.17
土壤-土壤	0.39	0.27	0.13

4.2 试验方法

将简化后的弓形拨齿式菖头收获机三维模型转化为 stp 格式,导入 EDEM 软件中建立仿真模型,几何模型导入网格尺寸为 8 mm,几何体材料全部为钢,设置机具整体向 X 轴前进运动与弓形拨辊的转动运动,设置仿真时长 5 s,数据采集时间间隔为 0.01 s,机具前进速度为 5 km/h,挖掘深度为 140 mm(比一般菖头地下生长位置 130 mm 加深 10 mm),仿真完成后通过后处理导出收集筐中菖头和土壤各质量,其仿真过程如图 14 所示。菖头与土块一同输送至输送提升装置进行分离提升作业,在此仿真过程中菖头在弓形拨齿的相互梳刷作用下进行初步去除土块和分离菖头团,随着弓形拨齿的高速转动使菖头向上输送与挡网发生二次碰撞搓擦去土。根据前文对菖头输送过程中运动学的理论分析,影响菖头果土分离效果的主要因素包括弓形拨齿转速、弓齿拨辊组提升角度和挡网倾角等。

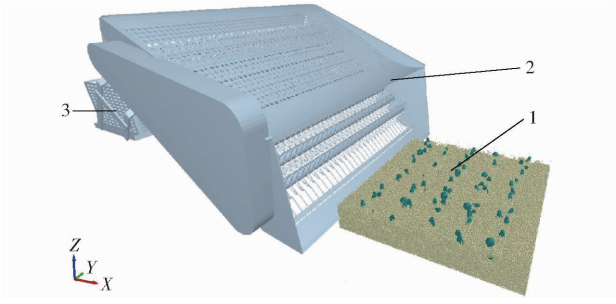


图 14 仿真作业

Fig. 14 Simulation operation

1. 混合土槽 2. 机具 3. 收集筐

4.3 二次回归正交组合试验

4.3.1 试验设计

运用 Design-Expert 13 软件中的 Box-Behnken 中性组合设计功能开展三因素三水平正交试验,结合输送提升碎土装置的工作原理以及前文理论分析,确定弓形拨齿转速、弓齿拨辊组提升角度和挡网倾角为试验影响因素。结合前期理论分析,以菖头破损和输送收集入筐情况为试验指标,仿真试验结果表明:当弓形拨齿转速低于 200 r/min 时,前端大块土壤无法被剪切破碎分离出来,超过 350 r/min 时菖头已开始出现损伤;弓齿拨辊组提升角度大于 40°时,菖头输送过程受阻,无法在弓形拨辊上进行碎土作业,同时大于 30°才能满足收集入筐高度要求;挡网倾角必须小于弓齿拨辊组提升角度,菖头才能与挡网进行多次撞击搓擦碎土。根据菖头收获机输送分离装置并结合上文理论分析结果,保证在初步分离菖头团的情况下,满足菖头与挡网发生多次有效的撞击搓擦碎土和提升收集入筐作业,得到弓形拨齿转速变化范围为 200~350 r/min、弓齿拨辊组提升角度变化范围为 30°~40°、挡网倾角变化范围为 20°~30°。

表 4 因素编码

Tab. 4 Coding of factors

编码	因素		
	弓形拨齿转速/(r·min^{-1})	弓齿拨辊组提升角度/(°)	挡网倾角/(°)
−1	250	30	20
0	300	35	25
1	350	40	30

藠头的输送分离装置主要实现了去除表面黏附土壤及提升输送藠头果实至收集筐内，可以将果土分离率视为输送分离装置去除的土壤与总土壤质量百分比，收集入筐率视为通过输送分离装置至收集筐中的藠头占总藠头质量的百分比，计算果土分离率 Y_1 和收集入筐率 Y_2 公式为

$$Y_1 = \frac{m_0 - m_2}{m_0 - m_1} \times 100\% \tag{12}$$

$$Y_2 = \frac{m_3}{m_1} \times 100\% \tag{13}$$

式中　m_0——土壤藠头总质量，kg

m_1——藠头初始总质量，kg

m_2——后端输送至收集筐中的土壤藠头质量，kg

m_3——后端输送至收集筐中的藠头质量，kg

4.3.2　多因素试验结果与分析

进行二次旋转正交组合试验，以弓形拨齿转速、弓齿拨辊组提升角度和挡网倾角为试验因素，以果土分离率和收集入筐率为优化指标，试验方案与试验结果如表 5 所示，方差分析如表 6 所示，表中 X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

表 5　试验方案和结果

Tab. 5　Experiment scheme and results

序号	X_1	X_2	X_3	Y_1/%	Y_2/%
1	1	0	1	86.10	84.47
2	0	1	−1	84.14	88.12
3	0	−1	−1	84.05	90.99
4	0	0	0	88.25	89.10
5	0	0	0	87.58	89.46
6	1	1	0	88.64	86.59
7	0	0	0	87.96	89.57
8	0	0	0	88.06	88.77
9	−1	1	0	87.18	86.79
10	0	−1	1	84.34	87.13
11	1	0	−1	84.39	87.48
12	0	1	1	87.18	85.80
13	0	0	0	88.55	88.42
14	−1	−1	0	86.20	90.84
15	−1	0	−1	83.85	89.34
16	−1	0	1	84.24	86.34
17	1	−1	0	87.37	87.97

对数据进行二次回归拟合分析，建立果土分离率 Y_1、收集入筐率 Y_2 与影响因素之间的回归模型，去除不显著项后，得到回归方程为

$$Y_1 = 88.08 + 0.628\,8X_1 + 0.647\,5X_2 + 0.678\,8X_3 + 0.072\,5X_2X_3 - 0.507\,5X_1^2 - 0.225X_3^2 \tag{14}$$

$$Y_2 = 89.06 - 0.85X_1 - 1.2X_2 - 1.52X_3 + 0.667\,5X_1X_2 - 1.06X_1^2 - 1.1X_3^2 \tag{15}$$

由表 6 可知，目标函数 Y_1、Y_2 的模型失拟项 P 值分别为 0.619 8 与 0.786 2，均大于 0.05，证明无失拟因素的存在，可以用回归方程代替真实试验结果进行分析。由方差分析可知，果土分离率 Y_1、收集入筐率 Y_2 模型的 P 值均小于 0.05。对于目标函数 Y_1，因素 X_1、X_2、X_3、X_2X_3、X_3^2 极显著，X_1^2 显著；对于目标函数 Y_2，因素 X_1、X_2、X_3、X_1^2、X_3^2 极显著，因素 X_1X_2 显著。

表 6　方差分析

Tab. 6　Variance analysis

项目	来源	平方和	自由度	均方	F	P
果土分离率	模型	51.22	9	5.69	51.86	<0.000 1 **
	X_1	3.16	1	3.16	28.82	0.001 **
	X_2	3.35	1	3.35	30.57	0.000 9 **
	X_3	3.69	1	3.69	33.59	0.000 7 **
	X_1X_2	0.021	1	0.021	0.191 6	0.674 8
	X_1X_3	0.435 6	1	0.435 6	3.97	0.086 6
	X_2X_3	1.89	1	1.89	17.23	0.004 3 **
	X_1^2	1.08	1	1.08	9.88	0.016 3 *
	X_2^2	0.213 2	1	0.213 2	1.94	0.206
	X_3^2	36.09	1	36.09	328.85	<0.000 1 **
	残差	0.768 1	7	0.109 7		
	失拟	0.253 5	3	0.084 5	0.656 9	0.619 8
	误差	0.514 6	4	0.128 7		
	总和	51.98	16			
收集入筐率	模型	48.68	9	5.41	32.57	<0.000 1 **
	X_1	5.78	1	5.78	34.80	0.000 6 **
	X_2	11.59	1	11.59	69.80	<0.000 1 **
	X_3	18.57	1	18.57	111.85	<0.000 1 **
	X_1X_2	1.78	1	1.78	10.73	0.013 6 *
	X_1X_3	0	1	0	0.000 2	0.990 6
	X_2X_3	0.592 9	1	0.592 9	3.57	0.100 8
	X_1^2	4.73	1	4.73	28.46	0.001 1 **
	X_2^2	0.007 8	1	0.007 8	0.046 9	0.834 8
	X_3^2	5.07	1	5.07	30.51	0.000 9 **
	残差	1.16	7	0.166 1		
	失拟	0.247 2	3	0.082 4	0.360 1	0.786 2
	误差	0.915 3	4	0.228 8		
	总和	49.85	16			

注：** 表示影响极显著（$P \leqslant 0.01$），* 表示影响显著（$0.01 < P < 0.05$）。

4.3.3　响应曲面分析

弓形拨齿转速固定条件下，弓齿拨辊组提升角度 X_2 与挡网倾角 X_3 交互作用对果土分离率 Y_1 影响的响应曲面如图 15a 所示，当弓齿拨辊组提升角度一定时，果土分离率随着挡网倾角的增加而增加，但是变化较缓慢；当挡网倾角一定时，果土分离率随着弓齿拨辊组提升角度的增加呈先增加后逐渐减少的趋势。挡网倾角固定，弓形拨齿转速 X_1 与弓齿拨辊组提升角度 X_2 交互作用对收集入筐率 Y_2 影响的响应曲面如图 15b 所示，当弓形拨齿转速一定时，收

集入筐率随着弓齿拨辊组提升角度的增加呈逐渐增大,趋于最高点的趋势;当弓齿拨辊组提升角度一定时,收集入筐率随着弓形拨齿转速的减小呈先增大后逐渐趋于平缓或者略微降低的趋势。

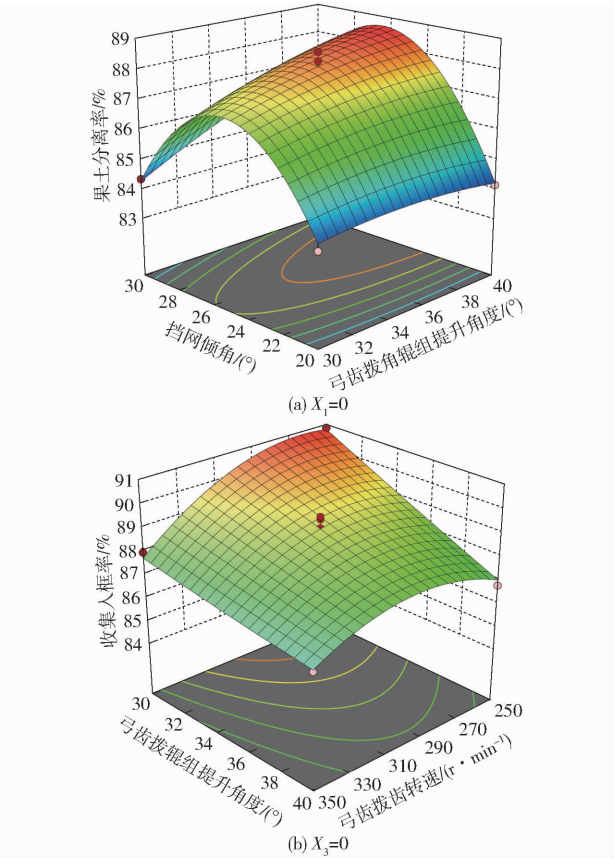


图 15 响应曲面图

Fig. 15 Response surface diagrams

4.3.4 参数优化

为实现装置最佳收获性能,运用 Design-Expert 13 软件进行二次旋转正交组合试验优化,对回归模型求解。遵循提高蔞头果土分离率和收集入筐率的原则,结合三因素的变量区间建立方程

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1,X_2,X_3) \\ \max Y_2(X_1,X_2,X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{16}$$

优化得到的最佳参数组合为:在弓形拨齿转速 294.40 r/min,弓齿拨辊组提升角度 31.65°,挡网倾角 24.36°时,蔞头收获机收获性能最佳,此最优参数组合下果土分离率为 87.40%,收集入筐率为 90.23%。

5 田间试验

5.1 试验条件

根据本文设计方案和关键部件参数,试制了 4J-160B 型蔞头收获机。试验地点位于常德市津市白衣镇红光村蔞头种植基地,以津市品种蔞头为研究对象,种植方式为垄作,垄宽 1 400 mm,行距 250 mm,蔞头平均生长深度 130 mm,土壤偏沙性干燥,土壤坚实度为 124 kPa,含水率为 15%。

5.2 试验方法

目前国内还没有针对蔞头收获装备的国家技术标准,试验参照 DB53/T 985—2020《三七机械化收获技术规程》,将果土分离率、收集入筐率和破损率作为评价蔞头收获作业性能的主要指标,根据式(12)计算果土分离率 Y_1;根据式(13)计算收集入筐率 Y_2;破损率 Y_3 计算式为

$$Y_3 = \frac{m_p}{m_j} \times 100\% \tag{17}$$

式中 m_j——收集筐中蔞头总质量,kg

m_p——收集筐中因外力造成的明显破皮、开裂的受损蔞头质量,kg

试验前使用茎秆杀殃机去除蔞头地表茎叶,使用标识牌规划 5 组长×宽为 5 m×1.4 m 的收获作业区域,蔞头收获机前进动力由雷沃 904 型拖拉机提供,通过三点悬挂调节挖掘深度至 140 mm。根据响应面优化结果选择弓形拨齿转速 295 r/min、弓齿拨辊组提升角度 32°和挡网倾角 24°,进行田间重复试验。蔞头收获机输送分离装置田间试验和作业后的收集入筐效果如图 16 所示。



(a) 4J-160B型蔞头收获机田间试验

(b) 收获作业效果

图 16 田间试验与作业效果

Fig. 16 Field trials

5.3 试验结果与分析

4J-160B 型蔞头收获机进行 5 组重复验证试验,取平均值,与 4DK-100 型蔞头收获机[29]的分离装置进行对比试验,试验结果如表 7 所示。果土分离率和收集入筐率均符合要求,且试验平均值与

回归模型预测结果相差分别为 1.36、1.58 个百分点，果土分离效果和收集入筐满足设计要求。

表 7　收获试验结果

Tab.7　Harvest trials results　　%

试验序号	4J－160B 型藠头收获机			4DK－100 型藠头收获机	
	果土分离率 Y_1	收集入筐率 Y_2	破损率 Y_3	果土分离率 Y_1	破损率 Y_3
1	85.06	87.74	5.81	77.95	5.59
2	82.38	87.21	4.83	79.97	7.82
3	90.14	90.24	7.69	79.62	6.21
4	85.85	89.64	7.78	80.54	6.09
5	86.76	88.4	5.61	81.7	7.11
均值	86.04	88.65	6.34	79.96	6.56

由表 7 可知，该弓形拨齿式藠头低损收获机果土分离率比传统振动和拨辊推送式藠头收获机高 6.08 个百分点，藠头的破损率降低了 0.22 个百分点；同时可完成对去土后藠头的收集入筐，收集入筐率为 88.65%。

6　结论

（1）设计了一种高转速弓形拨齿式藠头收获机输送分离装置，能一次完成输送提升、碎土分离和收集入筐等作业。通过对输送作业中不同阶段藠头进行动力学分析，找到影响果土分离和受损的主要因素为：弓形拨齿转速、弓齿拨辊组提升角度和挡网倾角等。

（2）创建藠头和土块混合物的离散元模型，机具开展收获模拟仿真，通过二次回归正交旋转组合试验求解最优参数组合为：弓形拨齿转速 294.40 r/min、弓齿拨辊组提升角度 31.65°和挡网倾角 24.36°，果土分离率为 87.40%、收集入筐率为 90.23%。

（3）以响应面优化结果进行田间试验，结果表明藠头收获机的果土分离率为 86.04%，破损率为 6.34%，其中果土分离率与回归模型预测结果相差 1.36%，满足设计要求，同时收集入筐率为 88.65%。

参　考　文　献

[1] 周向荣，夏延斌，周跃斌，等. 藠头的主要功能成分及其作用的研究进展[J]. 食品与机械，2006(3)：73－75.
ZHOU Xiangrong, XIA Yanbin, ZHOU Yuebin, et al. Investigation progress on main functional components and effects of *Allium Chinense* G. Don[J]. Food & Machinery, 2006, 22(3): 73－75. (in Chinese)

[2] 陆裕华，陈晟，陆陈后，等. 南方高山地区藠头两高一优栽培技术[J]. 长江蔬菜，2020(19)：4－6.
LU Yuhua, CHEN Sheng, LU Chenhou, et al. High-yield, good-quality and high-efficiency cultivation techniques for *Allium chinense* of Southern Alpine Region[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2020(19): 4－6. (in Chinese)

[3] VOLODYMYR B, SIMONE P, SEMJONS I, et al. A new spiral potato cleaner to enhance the removal of impurities and soil clods in potato harvesting[J]. Sustainability, 2020, 12(23): 9788.

[4] 陈学军，程和生，万新建，等. 绿色食品藠头栽培技术规程[J]. 江西农业学报，2009，21(8)：97－98.
CHEN Xuejun, CHENG Hesheng, WAN Xinjian, et al. Cultivation technology regulation of green food crop *Allium chinensis*[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2009, 21(8): 97－98. (in Chinese)

[5] 张国忠，张清洪，刘婉茹，等. 荸荠收获机弹簧辊式泥果分离装置研制[J]. 农业工程学报，2024，40(2)：164－175.
ZHANG Guozhong, ZHANG Qinghong, LIU Wanru, et al. Development of spring roller soil-corm separation device for water chestnut harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(2): 164－175. (in Chinese)

[6] 杨然兵，田光博，尚书旗，等. 马铃薯收获机辊组式薯土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(2)：107－118.
YANG Ranbing, TIAN Guangbo, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of roller group type potato soil separator for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 107－118. (in Chinese)

[7] 王相友，孙景彬，许英超，等. 拨辊推送式马铃薯清选分选机设计与试验[J]. 农业机械学报，2017，48(10)：316－322，279.
WANG Xiangyou, SUN Jingbin, XU Yingchao, et al. Design and experiment of potato cleaning and sorting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 316－322，279. (in Chinese)

[8] 王相友，吕丹阳，任加意，等. 装袋型马铃薯联合收获机清选装置研制[J]. 农业工程学报，2022，38(增刊)：8－17.
WANG Xiangyou, LÜ Danyang, REN Jiayi, et al. Design and parameter optimization of the cleaning device for a bagged potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(Supp.): 8－17. (in Chinese)

[9] 曲永波，方志超，柳亚峰，等. 振动和拨辊推送式藠头收获机研制[J]. 农业工程学报，2022，38(19)：51－59.
QU Yongbo, FANG Zhichao, LIU Yafeng, et al. Development of a vibrating and roller pushing type *Allium chinense* harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(19): 51－59. (in Chinese)

[10] 柳亚峰，方志超，夏海峰，等. 对辊拨刷式藠头收获机设计与试验[J]. 中国农业科技导报，2024，26(6)：72－81.
LIU Yafeng, FANG Zhichao, XIA Haifeng, et al. Design and experiment of a opposite roller extrusion type *Allium chinense* harvester[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(6): 72－81 (in Chinese)

[11] 吕金庆，杜长霖，刘中原，等. 马铃薯料斗机除杂装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(1)：82－90，61.
LÜ Jinqing, DU Changlin, LIU Zhongyuan, et al. Design and test of impurity removal device of potato receiving hopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 82－90，61. (in Chinese)

[12] 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.
[13] 杨德秋,汪昕,刘萌萌,等.自走式马铃薯捡拾装袋机设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(1):85-95.
YANG Deqiu, WANG Xin, LIU Mengmeng, et al. Design and experiment of self-propelled potato collecting and bagging machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(1):85-95. (in Chinese)
[14] 王法安, 温博, 谢晓红, 等. 三七收获机输送分离装置作业机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊1): 201-211, 259.
WANG Fa'an, WEN Bo, XIE Xiaohong, et al. Operation mechanism analysis and parameter optimization of conveying and separating device of *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.1): 201-211, 259. (in Chinese)
[15] DAI Z, WU M, FANG Z, et al. Calibration and verification test of lily bulb simulation parameters based on discrete element method[J]. Applied Sciences, 2021, 11(22):10749.
[16] 徐弘博, 张鹏, 张延化, 等. 多级切流式花生捡拾收获机摘果输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊): 52-60.
XU Hongbo, ZHANG Peng, ZHANG Yanhua, et al. Design and experiment of peanut pod-picking and conveying device of multistage tangential flow type peanut combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.): 52-60. (in Chinese)
[17] 申海洋, 罗伟文, 吴峰, 等. 花生机械化收获装备与技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2024,55(8): 21-38.
SHEN Haiyang, LUO Weiwen, WU Feng, et al. Research progress on mechanized harvesting equipment and technology for peanuts[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(8):21-38. (in Chinese)
[18] 吕金庆, 杨晓涵, 吕伊宁, 等. 马铃薯挖掘机升运分离过程块茎损伤机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 103-113.
LÜ Jinqing, YANG Xiaohan, LÜ Yining, et al. Analysis and experiment of potato damage in process of lifting and separating potato excavator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 103-113. (in Chinese)
[19] 康启新, 张国忠, 郑侃, 等. 勺夹式蔊头排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(5): 15-25.
KANG Qixin, ZHANG Guozhong, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of the spoon clip type seed metering device for *Allium chinense*[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(5): 15-25. (in Chinese)
[20] 张胜伟,张瑞雨,曹庆秋,等.油莎豆收获机双层滚筒筛式果杂分离装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(3):148-157.
ZHANG Shengwei, ZHANG Ruiyu, CAO Qingqiu, et al. Design and experiment of double-deck roller sieve type fruit impurity separation device for tiger nut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 148-157. (in Chinese)
[21] LI Hongchang, GAO Fang. Improvement design of separation and conveying machinery and equipment of potato excavator in heavy soil[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2023, 130:103363.
[22] 侯俊铭, 姚恩超, 李金澎,等. 搓压式蓖麻脱壳机脱壳过程运动分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 220-232.
HOU Junming, YAO Enchao, LI Jinpeng, et al. Motion analysis and experiment on shelling process of kneading and pressing castor shelling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 220-232. (in Chinese)
[23] 贺欣, 彭强吉, 李国明, 等. 花生秧根茎碰撞恢复系数测定试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊1): 156-164.
HE Xin, PENG Qiangji, LI Guoming, et al. Experiment on determination of recovery coefficient of peanut seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp.1): 156-164. (in Chinese)
[24] 张国忠, 陈立明, 刘浩蓬, 等. 荸荠离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 41-50.
ZHANG Guozhong, CHEN Liming, LIU Haopeng, et al. Calibration and experiments of the discrete element simulation parameters for water chestnut[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(11): 41-50. (in Chinese)
[25] 周俊, 孙文涛, 梁子安. 收获期菊芋根-块茎离散元柔性模型研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 124-132.
ZHOU Jun, SUN Wentao, LIANG Zi'an. Construction of discrete element flexible model for jerusalem artichoke root tuber at harvest stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 124-132. (in Chinese)
[26] 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)
[27] 邬备, 李卓, 向青苗, 等. 马铃薯切块薯种取种勺设计与仿真优化[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(2): 207-215.
WU Bei, LI Zhuo, XIANG Qingmiao,et al. Design and simulation optimization of seed picking spoon for cut-potato tubers[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(2):207-215. (in Chinese)
[28] 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):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.): 20-29. (in Chinese)
[29] 曲永波. 蔊头收获机关键部件设计与试验研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2023.
QU Yongbo. Design and experimental study of key components of *Allium chinense* G. Don harvester[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2023. (in Chinese)