doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.03.015

油莎豆收获机双层滚筒筛式果杂分离装置设计与试验

张胜伟[1]　张瑞雨[1]　曹庆秋[1]　张　岩[1]　付　君[1,2]　袁洪方[1]

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

摘要: 针对油莎豆机械化收获过程中块茎(果)与土壤草团(杂质)分离不彻底导致收获损失率与含杂率较高的问题,设计了一种双层滚筒筛式果杂分离装置,通过理论分析确定了该装置的主要结构参数与工作参数。建立了分离装置-收获物料互作的 EDEM - MBD 耦合仿真模型,以双层滚筒筛转速、分离螺旋输送器转速、柔性齿段长度为试验因素,以块茎分离率和含杂率为试验指标,依据 Box - Behnken 试验原理开展三因素三水平仿真试验。对试验结果进行方差分析,建立了分离率、含杂率与各显著因素之间的回归模型,利用回归模型进行参数寻优,结果表明:当双层滚筒筛转速为 24.9 r/min、分离螺旋输送器转速为 148.5 r/min、柔性齿段长度为 1 277.8 mm 时,分离率最大,为 96.23%,含杂率最小,为 25.55%。田间验证试验结果表明:最优参数组合下的果杂分离装置平均分离率为 93.19%,平均含杂率为 26.65%,与回归模型寻优结果基本一致;果杂分离装置与清选装置联合使用时,分离率增加 1.05 个百分点,含杂率降低 9.97 个百分点,可满足油莎豆收获生产需求。

关键词: 油莎豆收获机; 双层滚筒筛; 果杂分离装置; 离散元

中图分类号: S225.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2023)03-0148-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Double-deck Roller Sieve Type Fruit Impurity Separation Device for Tiger Nut Harvester

ZHANG Shengwei[1]　ZHANG Ruiyu[1]　CAO Qingqiu[1]　ZHANG Yan[1]　FU Jun[1,2]　YUAN Hongfang[1]

(1. *College of Biological and Agricultural Engineering*, *Jilin University*, *Changchun* 130025, *China*
2. *Key Laboratory of Bionics Engineering*, *Ministry of Education*, *Jilin University*, *Changchun* 130025, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of high loss rate and high impurity rate of tubers due to incomplete fruit impurity separation during the mechanised harvesting of tiger nuts, a double-deck roller sieve type fruit impurity separation device was designed. The main structure and working parameters of the fruit impurity separation device were determined through theoretical analysis. A coupled EDEM - MBD simulation model of separation device-harvest material interactions was established. A three-factor, three-level simulation experiment was carried out based on the Box - Behnken test principle, using the rotation speed of the double-deck roller sieve, the rotation speed of the separation auger, and the length of the flexible tooth area as test factors, and tuber separation rate and impurity rate as test indicators. An ANOVA was conducted on the test results and a regression model was established between the separation rate, impurity rate and each significant factor, and the regression model was used to search for the best parameters. The results showed that the three factors all had significant effects ($P<0.01$) on the separation rate and the impurity rate; when the rotating speed of the double-deck roller sieve was 24.9 r/min, the rotating speed of the separation auger was 148.5 r/min and the length of the flexible tooth area was 1 277.8 mm, the maximum separation rate was 96.23% and the minimum impurity rate was 25.55%. The results of the field validation tests showed that the average separation rate of the fruit impurity separation device under the best combination of parameters was 93.19% and the average impurity rate was 26.65%, which were basically consistent with the optimal results of the regression model; when the fruit impurity separation device was used in combination with the cleaning device, the separation rate was increased by 1.05 percentage points and the impurity rate was reduced by 9.97 percentage points, which could meet the working requirements of the tiger nut harvester.

Key words: tiger nut harvester; double-deck roller sieve; fruit impurity separation device; discrete element

收稿日期: 2022-11-08　修回日期: 2023-01-14

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20200502007NC)和吉林大学研究生创新基金项目(2022127)

作者简介: 张胜伟(1996—),男,博士生,主要从事仿生智能农业机械与保护性耕作研究,E-mail: zhangsw0825@163.com

通信作者: 袁洪方(1984—),男,副教授,博士,主要从事仿生智能农业机械与保护性耕作研究,E-mail: yhf1984828@163.com

0　引言

油莎豆是一种粮油饲兼用、综合利用价值较高的莎草科植物，其地下块茎油脂含量高达 25%，单位面积产油量是大豆的 4 倍，油菜的 2 倍，可制作食用油、润滑油、生物柴油等[1-2]。目前，我国食用植物油产需缺口较大，对外依存度较高，因此发展油莎豆产业对提高我国食用油自给率，保障国家粮油安全具有十分重大意义。

由于油莎豆块茎生长在地下，块茎(果)尺寸较小，与土壤草团(杂质)分离困难，导致机械化收获损失率高、清洁度低，从而严重制约了油莎豆产业发展[3-4]。现有的油莎豆收获机多数是由马铃薯、中药材等块茎类收获机改进而成[5-7]，一般只具备挖掘和脱土功能，少数联合收获机增加了果杂分离装置与二次清选装置，但是由于结构或工作参数配置不佳，存在果杂分离不彻底，从而导致收获损失率与含杂率较高的问题。因此为提高油莎豆收获时的果杂分离率、降低收获损失率与含杂率，有必要对油莎豆收获机的核心工作部件——果杂分离装置进行设计优化，从而提高油莎豆机械化收获水平。

滚筒筛作为回转运动部件，在谷物脱粒及分离清选等农机作业环节中应用广泛。例如 WANG 等[8]设计了一种内外回转滚筒式荞麦脱粒机，并分析了脱出物分布规律；王升升等[9]为满足大白菜种子收获清选需求，设计了一种由圆筒筛与横流风机组合的分离清选装置，有效解决了大白菜种子机收含杂率、损失率高的问题；万星宇等[10]针对油菜联合收获的清选环节清洁率低的问题，设计了一种差速滚筒筛分离清选装置，为油菜联合收获机清选系统的结构改进和优化提供了参考；彭强吉等[11]针对气力式圆筒筛膜杂分离机筛分性能波动大的问题，增设运移装置、重置圆筒筛筛孔排布与尺寸，有效提高了膜杂分离性能；YUAN 等[12]基于 CFD－DEM 模拟方法研究了水稻脱粒混合物在圆筒筛内的运动规律和筛分特性。上述学者已探索了单层滚筒筛作为脱粒部件、分离清选部件的工作机理，但对于双层滚筒筛作为分离清选部件的设计及机理研究鲜有报道。

本文针对油莎豆机收过程中果杂分离不彻底导致收获损失率、含杂率较高的问题，设计一种双层滚筒筛式果杂分离装置，通过理论分析确定关键部件的结构和工作参数取值范围，基于 EDEM－MBD 耦合仿真优化试验，求解分离装置最优工作参数组合，并利用田间试验验证仿真结果的可靠性。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构及技术参数

4GQ－1.3－A 型油莎豆收获机整机结构如图 1 所示，主要由机架、果杂分离装置、吸杂风机、提升装置、粮箱、传动系统、旋挖装置、输送网筛、行走装置、振动筛等零部件组成。作业时，整机由拖拉机后输出轴提供动力，首先旋挖装置将土壤及油莎豆植株挖掘抛送至输送网筛上；其次输送网筛在升运过程中漏除部分土壤，并把混合物运至果杂分离装置中；然后分离装置对油莎豆与土壤、草等杂余进行初步分离作业；被分离出的植株根茎与草团等大杂余经内层滚筒筛排料口进入上层振动筛进行清选作业，被分离出的油莎豆及小杂余经外层滚筒筛排料口进入下层振动筛进行清选作业，最后在风力及振力作用下完成清选的块茎通过提升装置进入粮箱。整机参数如表 1 所示。

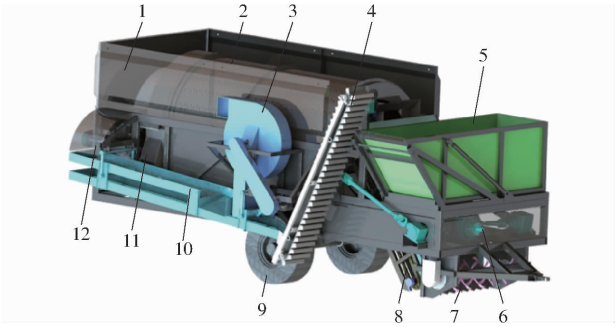


图 1　油莎豆收获机结构示意图

Fig. 1　Structure diagram of tiger nut harvester

1. 机架　2. 果杂分离装置　3. 吸杂风机　4. 提升装置　5. 粮箱　6. 传动系统　7. 旋挖装置　8. 输送网筛　9. 行走装置　10. 振动筛　11. 外层滚筒筛排料口　12. 内层滚筒筛排料口

表 1　油莎豆收获机主要技术参数

Tab. 1　Tiger nut harvester main parameters

参数	数值/型式
行走方式	牵引式
清选方式	振动筛＋吸杂风机
配套动力/kW	80
挖掘深度/mm	100～200(可调)
工作幅宽/mm	1 300
作业速度/(km·h^{-1})	1.15
挖掘喂入量/(kg·s^{-1})	68
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 900×2 700×2 580

1.2　果杂分离装置结构及工作原理

果杂分离装置是油莎豆收获机的主要工作部件，主要作用是将挖掘后的油莎豆与大量土壤、草团等杂质分离，其结构示意图如图 2a 所示。包括挡土板、内层滚筒筛、外层滚筒筛、分离螺旋输送器、传动装置、提升刮板、内辊刷、外辊刷等零部件。其中内

外层滚筒筛均由平面冲孔筛环形弯折定型,两层滚筒筛同心固接,由传动装置的齿轮齿圈啮合驱动旋转,同时动力经传动装置的传动轴、联轴器、换向器等传递到分离螺旋输送器,分离螺旋输送器与滚筒筛偏心安装,二者形成逆向差速运动。

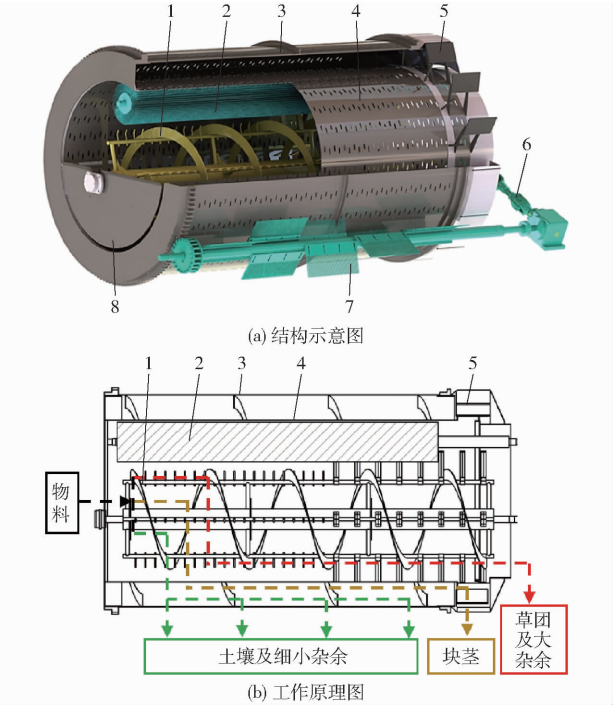


图 2 果杂分离装置结构与工作原理图

Fig. 2 Diagrams of structure and working principle of fruit-impurity separation device

1. 分离螺旋输送器 2. 内辊刷 3. 外层滚筒筛 4. 内层滚筒筛 5. 提升刮板 6. 传动装置 7. 外辊刷 8. 挡土板

该装置工作原理如图 2b 所示,首先输送网筛将旋挖后的油莎豆植株与土壤形成的混料输送至内层滚筒筛中,随着内层滚筒筛与分离螺旋输送器的异向差速转动,混料受重力、摩擦力、离心力、击打力、轴向推力等多重作用力,使块茎与杂质分离。分离后的物料分为两部分:较长的茎叶与草团等大杂物(含少量块茎),该部分物料尺寸较大,无法透过内层滚筒筛筛孔,进而通过分离螺旋输送器的轴向推动作用从内层滚筒筛尾部排出;块茎和土壤、短碎草根等细小杂余,该部分物料透过内层滚筒筛进入外层滚筒筛,然后土壤及短碎草根等细小杂余在外层滚筒筛离心力等作用下透过筛孔落入地面,而尺寸相对较大的块茎被外层滚筒筛中的导流板推送至尾部,在尾部提升刮板的作用下排出。

2 关键部件设计与参数分析

2.1 双层滚筒筛

2.1.1 滚筒筛直径与长度

滚筒筛的直径和长度直接影响其筛分效率,两参数在滚筒筛设计中一般采用经验值确定[13]。由于油莎豆收获时约将 15 cm 以上的土壤全部挖起,筛土量巨大,为保证脱土效率,同时考虑到整机工作幅宽与安装空间,取内层筛内径 $D_1=1.3$ m,外层筛内径 D_2 计算则根据经验公式[14]

$$D_2=\left(\frac{11.36Q_m}{\rho K_1K_2\sqrt{g}\tan\theta}\right)^{0.4} \tag{1}$$

式中 Q_m——外层筛喂入量,kg/s

ρ——混料容积密度,kg/m^3

g——重力加速度,取 9.8 m/s^2

θ——滚筒筛倾角,(°)

K_1——外层筛填充系数

K_2——转速修正系数

根据机器作业要求,Q_m 取 46 kg/s;试验测得混料容积密度 ρ 为 1 304 kg/m^3;填充系数 K_1 取 0.3;滚筒筛水平安装,但在田间作业时受地形影响,为方便估算,取倾角 θ 为 4°,则转速修正系数 K_2 取 1.6[14];通过式(1)计算得到外层筛内径 $D_2\approx1.7$ m。

根据经验,滚筒筛长度一般为其直径的 2 ~ 6 倍[13],考虑到滚筒筛安装空间,取滚筒筛长度 L 为直径的 2 倍,则有

$$2D_1\leqslant L\leqslant 2D_2 \tag{2}$$

即 2.6 m$\leqslant L\leqslant$3.4 m,取双层滚筒筛长度 L 为 3 m。

2.1.2 筛网选型及筛孔设计

筛网类型和筛孔形状、尺寸及排列方式直接影响筛分效果。农业物料筛分中常用筛网类型主要有栅格筛、冲孔筛及编织筛。其中冲孔筛相对于栅格筛质量较轻,制造工艺简单;相对于编织筛刚度强、不易变形;因此选用厚度为 3 mm 的冲孔筛[15]。冲孔筛的常见筛孔形状主要有圆孔、方孔、三角孔及长圆孔,本文选用筛分效率较高的长圆孔。

当筛网面积一定时,筛孔尺寸及排列方式与筛面利用系数 K_d 有关,筛面利用系数越高,筛分效率越高,筛分效果越好[16]。如图 3 所示,筛孔排列方式采用同向交错排列,则筛面利用系数 K_d 为

$$K_d=\frac{dh-\left(1-\frac{\pi}{4}\right)d^2}{ck} \tag{3}$$

式中 d——筛孔宽度,mm

h——筛孔长度,mm

c——横向孔距,mm

k——纵向孔距,mm

内外两层筛网的筛孔尺寸需根据油莎豆的三轴尺寸范围确定。通过试验测量品种“吉莎 1 号”与“中油莎 1 号”的块茎三轴尺寸范围在 7.5 ~ 16 mm

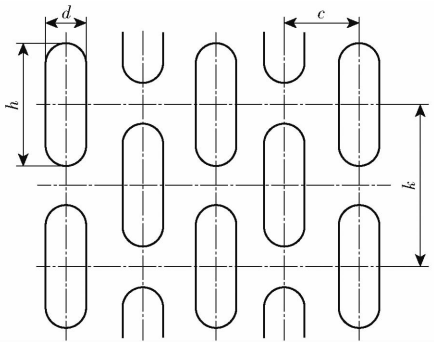


图 3　筛孔排列方式

Fig. 3　Arrangement of sieve holes

之间，为保证块茎顺利透过内层筛，内层筛筛孔长度设计为 50 mm，宽度为 20 mm；为保证土壤透筛且块茎不被外层筛筛出，外层筛筛孔长度设计为 80 mm，宽度为 6 mm。为保证筛体结构的强度与刚度，内层筛孔横向孔距取 25 mm，纵向孔距取 55 mm；外层筛孔横向孔距取 10 mm，纵向孔距取 84 mm。通过式(3)计算得到内层筛筛面利用系数为 66%，外层筛筛面利用系数为 56%。

2.1.3　筛内物料受力分析

滚筒筛内物料的运动及受力状态决定了其筛分效果，对滚筒筛内部的颗粒运动及受力状态分析，有利于确定较佳的滚筒筛转速。根据文献[17]可知，物料在滚筒筛内存在滑塌运动、抛落运动及离心运动 3 种状态，当物料做抛落运动时，筛分效率最高，滑塌运动次之。但由 2.1.1 节可知，本文所设计的双层滚筒筛尺寸较大，内外两层筛筛面最小间距仅 20 cm，考虑到机器工作时的稳定性，同时也为防止筛分时外层筛中的土壤颗粒抛落到内层筛中，滚筒筛转速不宜过高，筛内物料不宜做抛落运动。因此可分析外层筛内物料在发生滑塌运动时的受力状态即可确定双层滚筒筛转速范围(内外两层筛同心固接，转速一致)。

外层筛主要起筛土作用，土壤颗粒在滑塌运动时可分为沿筛面下滑阶段与沿筛孔甩出阶段，忽略物料之间、物料与螺旋导流板之间的作用力，土壤颗粒在两阶段的受力如图 4 所示。

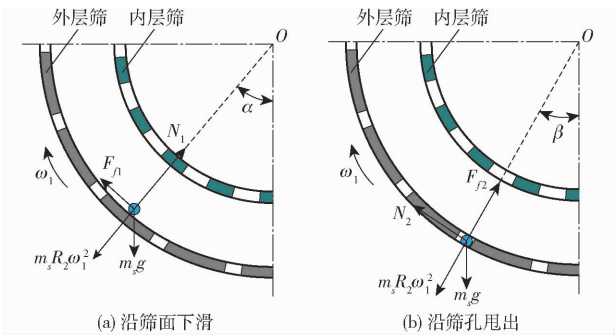


图 4　土壤透筛过程受力分析

Fig. 4　Force analysis of soil sieving process

如图 4 所示，土壤颗粒沿筛面下滑受力方程为

$$\begin{cases} F_{f1} - m_s g\sin\alpha = 0 \\ N_1 - m_s g\cos\alpha - m_s R_2\omega_1^2 = 0 \\ F_{f1} = \mu N_1 = \tan\varphi N_1 \end{cases} \tag{4}$$

解得

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{g\sin(\alpha-\varphi)}{R_2\sin\varphi}} \tag{5}$$

土壤颗粒沿筛孔甩出受力方程为

$$\begin{cases} N_2 - m_s g\sin\beta = 0 \\ F_{f2} - m_s g\cos\beta - m_s R_2\omega_1^2 = 0 \\ F_{f2} = \mu N_2 = \tan\varphi N_2 \end{cases} \tag{6}$$

解得

$$\omega_1 = \sqrt{-\frac{g\cos(\beta+\varphi)}{R_2\cos\varphi}} \tag{7}$$

式中　m_s——土壤颗粒质量，kg

R_2——外层筛半径，m

ω_1——滚筒筛角速度，rad/s

N_1——筛面对土壤支持力，N

F_{f1}——筛面对土壤摩擦力，N

N_2——筛孔对土壤支持力，N

F_{f2}——筛孔对土壤摩擦力，N

α——滑动平衡角，rad

β——甩出平衡角，rad

φ——土壤与钢板之间滑动摩擦角，取 26°

R_2 与 φ 为常数，取角速度 ω_1 为任意值代入式(5)、(7)可知：同一角速度下，甩出平衡角总是大于滑动平衡角，说明土壤颗粒在下滑过程中遇到筛孔即可由筛孔甩出，因此可根据土壤颗粒的滑动条件确定滚筒筛转速。

试验测得土壤与钢板之间滑动摩擦角 φ 为 26°，为保证筛土效率，滑动平衡角 α 最小值应比滑动摩擦角 φ 大 5°~10°，取 α_{min} 为 34°。α 越大，物料滑动区域越长，但 α 大于 90°之后，土壤颗粒下滑运动将变成脱离筛面、呈抛物线的下落运动，为防止土壤颗粒回落到内层筛中，取 α_{max} 为 90°。

已知外层筛半径 $R_2 = D_2/2 = 0.85$ m，将 α_{min} 与 α_{max} 代入式(5)中得双层滚筒筛角速度范围：1.91 rad/s ≤ ω_1 ≤ 4.86 rad/s，转换为转速为：18.2 r/min ≤ n_1 ≤ 46.4 r/min。

2.2　分离螺旋输送器

分离螺旋输送器结构如图 5 所示，主要由安装轴、齿杆、螺旋叶片、钉齿、柔性齿组成。

2.2.1　螺旋叶片设计

螺旋叶片焊接在齿杆上，具有助流输送、分散混料的作用，其结构与工作参数(包括螺旋升角 α_o、螺距 S_o、叶片外径 D_w、叶片内径 D_n、安装轴直径 d_o 与转速 n_2)直接影响物料的输送与筛分效果。为确定螺旋叶片的最佳结构及工作参数，如图 6 所示，将螺

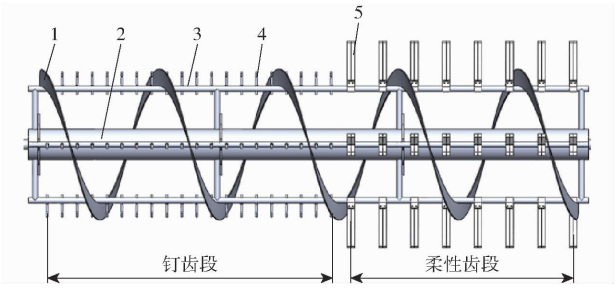
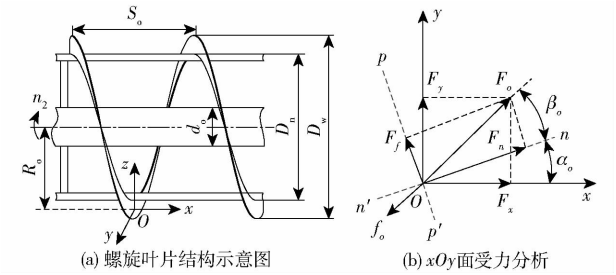


图 5 分离螺旋输送器结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of separation auger

1. 螺旋叶片 2. 安装轴 3. 齿杆 4. 钉齿 5. 柔性齿



(a) 螺旋叶片结构示意图 (b) xOy面受力分析

图 6 螺旋叶片结构示意图与物料受力分析图

Fig. 6 Spiral blade structure and material force analysis

旋叶片上点 O 处的物料视为质点进行受力分析。

由图 6b 可知,物料在水平面(xOy 面)的受力包括:螺旋叶片对物料的法向推力 F_n 和切向摩擦力 F_f;筛网对物料的摩擦力 f_o。在水平面内,螺旋叶片对物料作用合力 F_o 在切向摩擦力 F_f 的作用下偏离了一个角度 β_o(摩擦角)。图中 pp' 为螺旋面切线,nn' 为螺旋面法线。

如图 6b,将 F_o 分解为轴向分力 F_x 和径向分力 F_y。其计算式为

$$\begin{cases} F_x = F_o\cos(\alpha_o + \beta_o) \\ F_y = F_o\sin(\alpha_o + \beta_o) \end{cases} \tag{8}$$

若使油莎豆混料沿 x 轴正向运动,则需满足

$$F_n\cos\alpha_o > F_f\sin\alpha_o + f_o\sin(90 - \alpha_o - \beta_o) \tag{9}$$

对式(9)缩放得

$$F_n\cos\alpha_o > F_f\sin\alpha_o \tag{10}$$

即

$$F_n\cos\alpha_o > F_n\tan\beta_o\sin\alpha_o \tag{11}$$

$$\cot\alpha_o > \tan\beta_o \tag{12}$$

从而得到 $\alpha_o < 90° - \beta_o$,根据油莎豆混料与钢的摩擦测量试验,取 $\beta_o = 35°$,则 $\alpha_o < 55°$,取 $\alpha_o = 18°$。

螺旋叶片外径 D_w 计算式为[18]

$$D_w > \left(\frac{Q_o}{47K_oA_o\psi\lambda\rho}\right)^{0.4} \tag{13}$$

式中 K_o——螺距系数,取 0.8

A_o——物料综合特性系数,取 40

Q_o——内层筛喂入量,取 48 kg/s

ψ——内层筛物料填充系数,取 0.3

λ——倾斜输送系数,水平输送时取 1

通过计算,结合零部件安装空间取叶片外径 $D_w = 800$ mm。螺距及安装轴直径计算式为[19-20]

$$S_o = (0.8 \sim 1)D_w \tag{14}$$

$$d_o = (0.2 \sim 0.35)D_w \tag{15}$$

计算得 $S_o = 640$ mm、$d_o = 180$ mm。

为提高螺旋叶片的连续输送能力,叶片的内外径之差应略大于钉齿工作高度的 2 倍,参考《农业机械设计手册》,钉齿工作高度一般取 45 ~ 75 mm,本文取 70 mm,则叶片内径 D_n 设计为 620 mm。

螺旋叶片的轴向输送能力需大于内层滚筒筛的喂入量[19],即

$$\frac{\pi}{24}[(D_w - \delta_o)^2 - D_n^2]\psi S_o n_2\lambda\rho \times 10^{-10} > Q_o \tag{16}$$

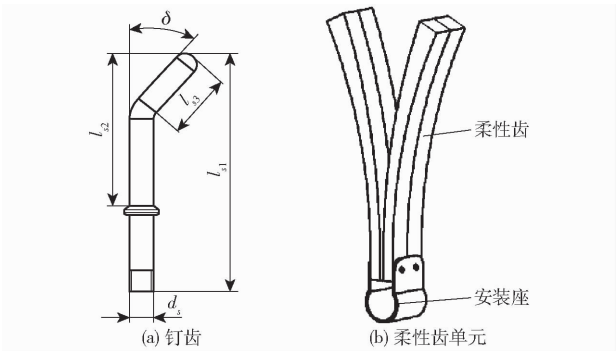
式中 δ_o——叶片外缘与内层滚筒筛的最小间隙,取 30 mm

计算得 $n_2 > 70.3$ r/min。

2.2.2 分离齿设计

分离齿包括钉齿和柔性齿。物料进入内层滚筒筛后,首先钉齿将植株根系连接的油莎豆以及物料中夹杂的油莎豆击打脱落,同时对土壤起到搅拌击打作用,促使其快速透筛;然后柔性齿进一步将未透筛的草团打散,使草团中夹杂的油莎豆分离彻底,从而降低夹带损失率。

钉齿结构如图 7a 所示,参考《农业机械设计手册》,钉齿直径 d_s 设计为 10 mm,整体高度 l_{s1} 为 110 mm,工作高度 l_{s2} 为 70 mm,为避免缠草,钉齿顶部向后弯曲角度 δ 为 40°[21],弯曲部分长度 l_{s3} 为 30 mm,材料为 65Mn 钢。



(a) 钉齿 (b) 柔性齿单元

图 7 钉齿与柔性齿结构示意图

Fig. 7 Structure diagrams of spike teeth and flexible teeth

钉齿齿顶圆直径 D_Z 计算式为

$$D_Z = D_n + 2h_o \tag{17}$$

计算得 $D_Z = 0.76$ m。

为提高钉齿分离效率,钉齿采用螺旋线排列,螺线头数为 4;根据《农业机械设计手册》,齿杆数一般取 4 ~ 6,齿间距一般取 50 ~ 100 mm,结合滚筒空间

布置，齿杆数取 4，齿间距为 80 mm，每个齿杆上钉齿数初步设计为 20，则确定钉齿段长度 $h_1=1\,520$ mm。

钉齿的线速度越大，块茎破损率越高，根据赫兹接触理论，块茎与钉齿接触瞬间，钉齿线速度 v_z 为[22]

$$v_z=\sqrt{\frac{\pi^5\sigma^5R_e^3}{30E^4m_zF_2}} \tag{18}$$

式中　σ——块茎破损最小临界应力，取 11.8 MPa

R_e——等效相对曲率半径，取 4.6 mm

E——等效弹性模量，取 42.8 MPa

m_z——单个块茎质量，取 1.6 g

$F_2(e)$——修正系数，取 1

通过试验测定与查阅文献[22]得到上述参数，代入式(18)计算得到 $v_z\approx6.5$ m/s，换算成转速为 163.4 r/min。

结合式(16)得到分离螺旋输送器转速范围为：70.3 r/min $<n_2<$ 163.4 r/min。

柔性齿结构如图 7b 所示，柔性齿单元由 4 个柔性齿与安装座组成，根据油莎豆茎叶与根系形成的草团大小，将每个柔性齿长度设计为 180 mm，宽度为 20 mm，底部厚度为 10 mm，为增加柔性齿的甩打力，顶部厚度设计为 20 mm，柔性齿安装间距为 160 mm，材料为橡胶加聚氨酯布，初步设计柔性齿段长度 $h_2=1\,120$ mm。则钉齿段与柔性齿段的总长为 2 640 mm，h_1 与 h_2 比值为 19∶14，两段的具体长度则根据后续仿真及验证试验确定。

3　基于 EDEM－MBD 耦合的果杂分离性能仿真

通过对关键部件的设计及参数分析，初步确定双层滚筒筛转速范围、分离螺旋输送器转速范围以及钉齿段与柔性齿段长度比，为明确上述 3 个参数最优值，建立物料分离装置的 EDEM－MBD 耦合仿真模型，开展分离性能仿真试验，深入分析上述 3 个参数对果杂分离性能的影响，从而得出最优参数组合。

3.1　仿真模型及参数设置

试验所用油莎豆品种为“吉莎 1 号”，取自吉林省农安县油莎豆种植基地(44°64′N，124°76′E)，种植地区土壤为沙壤土，土质松散、无结块现象。油莎豆植株被旋挖时，旋耕刀片将植株与土壤团聚体破碎，由于油莎豆块茎-根系节点连接力极小，通过预试验发现挖掘时多数块茎已被击打脱落，果杂分离过程中因块茎未被摘净导致的损失较小，而块茎被夹杂在草团与土壤中难以分离是造成损失率较高的主要原因。因此为便于后续仿真试验，不考虑块茎未被摘净的情况，即分别建立油莎豆块茎和杂质(土壤、根系、茎叶)的仿真模型。

如图 8a 所示，在 EDEM 中采用随机分布方式生成土壤球形颗粒仿真模型，直径范围为 1～3 mm。如图 8b 所示，依据块茎三轴尺寸将其分为大粒与小粒，在 EDEM 中利用多球体组合功能建立块茎的仿真模型，大、小粒块茎模型均由 3 个标准球体组成，其中组成大粒块茎模型的球体半径从左至右依次为 5.3、5.75、5.3 mm，长 13 mm，高 11.5 mm；组成小粒块茎模型的球体半径从左至右依次为 4.2、4.6、4.2 mm，长 10.4 mm，高 9.2 mm。依据旋挖后油莎豆植株根系与茎叶的形状尺寸与力学特性，基于 Hertz－Mindlin with bonding 模型[23]分别建立根系(图 8c)与茎叶(图 8d)的柔性模型，其中根系由直径为 1 mm 的球形颗粒组成，长根长度为 100 mm，短根长度为 40 mm；茎叶由直径 4 mm 球形颗粒组成，长茎叶长度为 120 mm，短茎叶长度为 50 mm。粘结参数设置如表 2 所示。

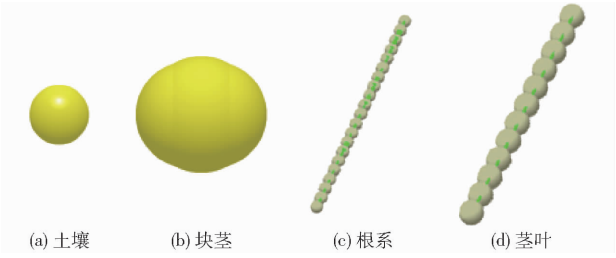


图 8　物料仿真模型

Fig. 8　Simulation models of materials

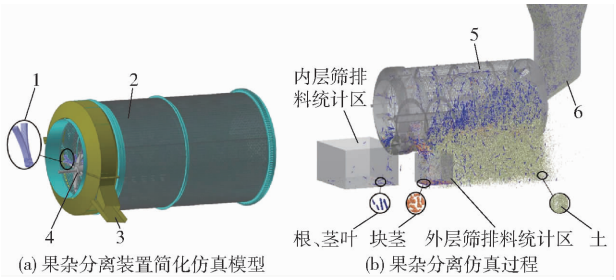
表 2　植株接触模型参数

Tab. 2　Contact model parameters of plant

参数	根-根	叶-叶
单位法向刚度/(N·m^{-3})	1.7×10^8	8.4×10^7
单位切向刚度/(N·m^{-3})	9.2×10^7	6.5×10^6
法向强度/Pa	3.6×10^5	1.4×10^5
剪切强度/Pa	1.7×10^5	1.1×10^5
粘结半径/mm	1	3

利用 SolidWorks 软件构建果杂分离装置三维模型，保存成 IGS 格式，导入 RecurDyn V9R4 软件。如图 9a 所示，为提高仿真效率，将模型简化为 3 部分：双层滚筒筛(由内层滚筒筛、外层滚筒筛与提升刮板合并组成)、分离螺旋输送器(由安装轴、齿杆、螺旋叶片、钉齿、柔性齿合并组成)、外层筛出料口。利用 RecurDyn V9R4 软件中的 Flexible 模块将柔性齿转化为柔性体，通过 EDEM 与 RecurDyn 耦合接口，建立 EDEM－MBD 耦合仿真模型。如图 9b 所示，仿真模型主要包括颗粒工厂、果杂分离装置、外层筛排料统计区、内层筛排料统计区。仿真时，基于输送网筛喂入量及各组分比例设定参数，物料生成

总速率为 48 kg/s,其中土壤占 93%、块茎占 4%(大粒与小粒质量比为 3∶1)、植株占 3%(根系与茎叶质量比为 1∶2),颗粒生成时间为 5 s,总仿真时间为 20 s,时间步长设置为 20%,数据保存时间间隔为 0.5 s。



(a) 果杂分离装置简化仿真模型 (b) 果杂分离仿真过程

图 9 EDEM - MBD 耦合仿真模型

Fig. 9 EDEM - MBD coupling simulation models

1. 柔性齿 2. 双层滚筒筛 3. 外层筛出料口 4. 分离螺旋输送器 5. 果杂分离装置 6. 颗粒工厂

由于种植地区土壤为沙壤土,土壤松散,含水率较低,因此颗粒与颗粒、颗粒与几何体之间的基础接触模型选取 Hertz - Mindlin (no slip)接触模型,各物料的离散元仿真参数通过试验测量与参照文献[24]获取,如表 3、4 所示。

表 3 物料本征参数

Tab. 3 Intrinsic parameters of materials

物料	密度/(kg·m^{-3})	泊松比	剪切模量/Pa
土壤	1 638	0.3	1.15×10^{7}
块茎	1 083	0.4	3.34×10^{7}
植株	470	0.4	1.72×10^{6}
装置	7 850	0.3	7.00×10^{10}

注:植株包括根系、茎叶。

表 4 物料接触参数

Tab. 4 Contact parameters of materials

物料	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
土壤-土壤	0.40	0.50	0.30
土壤-块茎	0.50	0.50	0.30
土壤-植株	0.48	0.05	0.32
土壤-装置	0.40	0.43	0.35
块茎-块茎	0.43	0.48	0.05
块茎-植株	0.35	0.05	0.10
块茎-装置	0.45	0.41	0.06
植株-植株	0.34	0.08	0.35
植株-装置	0.33	0.10	0.30

3.2 仿真正交试验

3.2.1 试验方案与结果

结合关键部件设计及参数分析,选取双层滚筒筛转速、分离螺旋输送器转速及柔性齿段长度为试验因素,以块茎分离率 Y_1、含杂率 Y_2 为评价指标,依据 Box - Behnken 试验原理开展三因素三水平仿真试验,试验因素编码如表 5 所示(柔性齿段长度分别为 640、1 120、1 600 mm 时,钉齿段长度则分别为 2 000、1 520、1 040 mm)。为方便试验,将因素编码值取整。仿真结束后收集外层筛排料统计区的块茎质量 m_1、杂余质量 m_2,内层筛排料统计区的块茎质量 m_3。分离率 Y_1 与含杂率 Y_2 计算公式为

$$Y_1 = m_1/(m_1+m_3)\times100\% \tag{19}$$

$$Y_2 = m_2/(m_1+m_2)\times100\% \tag{20}$$

表 5 试验因素编码

Tab. 5 Test factors and codes

编码	因素		
	双层滚筒筛转速/(r·min^{-1})	分离螺旋输送器转速/(r·min^{-1})	柔性齿段长度/mm
-1	18	70	640
0	32	117	1 120
1	46	164	1 600

试验方案设计与结果如表 6 所示,A、B、C 为因素编码值。

表 6 试验方案及结果

Tab. 6 Test scheme and results

编号	因素			Y_1/%	Y_2/%
	A	B	C		
1	-1	-1	0	89.3	22.4
2	1	-1	0	84.1	19.8
3	-1	1	0	93.6	24.1
4	1	1	0	89.8	20.2
5	-1	0	-1	85.0	19.8
6	1	0	-1	80.9	18.2
7	-1	0	1	98.9	31.5
8	1	0	1	92.9	29.4
9	0	-1	-1	76.2	12.6
10	0	1	-1	82.7	18.4
11	0	-1	1	91.4	27.2
12	0	1	1	94.3	26.1
13	0	0	0	93.6	24.1
14	0	0	0	93.3	23.3
15	0	0	0	92.7	23.9
16	0	0	0	93.4	23.6
17	0	0	0	92.9	24.4

3.2.2 回归模型建立及显著性分析

对上述结果进行方差分析,结果如表 7。由表 7 可知,对于分离率回归模型,A、B、C、BC、B^2 与 C^2 对分离率影响极显著($P<0.01$),交互项 AC 对分离率影响显著($P<0.05$),通过 F 值可判断,一次项对分离率的影响显著性主次顺序为 C、B、A。对于含杂率回归模型,A、B、C、BC 与 B^2 对含杂率影响极显著($P<0.01$),A^2 对含杂率影响显著($P<0.05$),通过 F 值可判断,一次项对含杂率的影响显著性主次顺序为 C、A、B。

表 7　分离率与含杂率方差分析

Tab. 7　ANOVA for separation rate and impurity rate

方差来源	分离率		含杂率	
	F	*P*	*F*	*P*
模型	345.43	<0.000 1	96.94	<0.000 1
A	230.45	<0.000 1	34.99	0.000 6
B	273.74	<0.000 1	15.55	0.005 6
C	1 921.63	<0.000 1	687.03	<0.000 1
AB	2.85	0.135 2	1.14	0.321 8
AC	9.83	0.016 5	0.17	0.694 0
BC	18.85	0.003 4	32.02	0.000 8
A^2	1.72	0.231 0	5.67	0.048 8
B^2	338.13	<0.000 1	98.08	<0.000 1
C^2	269.24	<0.000 1	0.28	0.612 4
失拟项	1.59	0.323 7	3.41	0.133 6

利用 Design-Expert 软件开展多元回归拟合分析，剔除不显著项后，分别建立分离率、含杂率与各显著因素之间的回归方程

$$Y_1 = 93.68 - 2.23A + 2.42B + 6.43C - 0.65AC - 0.9BC - 3.72B^2 - 3.31C^2 \quad (21)$$

$$Y_2 = 23.86 - 1.28A + 0.85B + 5.65C - 1.72BC + 0.71A^2 - 2.94B^2 \quad (22)$$

由表 7 可知，分离率与含杂率的回归模型均极显著（$P<0.01$），失拟项均不显著（$P>0.05$），说明拟合的回归方程具有高度可靠性，可根据上述两个回归模型求解 3 个因素的最优参数组合。

3.2.3　交互作用对试验指标影响分析

通过 Design-Expert 软件得到 3 个因素交互作用对分离率与含杂率影响的响应曲面，如图 10 所示。图 10b 比图 10a 的等高线曲率大，说明柔性齿段长度与分离螺旋输送器转速的交互作用对分离率的影响比柔性齿段长度与双层滚筒筛转速的交互作用对分离率的影响更显著。由图 10a 可知，分离率与双层滚筒筛转速呈负相关关系，与柔性齿段长度呈正相关关系，柔性齿段长度影响更明显，因为随着柔性齿段长度增大，则柔性齿个数增多，对混料的翻打次数增加，减少了植株、土壤对块茎的裹合，块茎透过内层筛的概率增大，分离率快速增大。由图 10b 可知，分离率与分离螺旋输送器转速呈先正后负相关关系，原因在于：随着分离螺旋输送器转速增大，会使钉齿及柔性齿对物料的击打频次增多，使块茎充分透过内层筛，分离率随之增大，但转速过大，物料在内层筛中被螺旋叶片快速推至内层筛尾部出口，筛分时间过短，造成分离率减小。由图 10c 可知，含杂率与分离螺旋输送器转速呈先正后负相关关系，与柔性齿段长度呈正相关关系，柔性齿段长度对响应面影响更明显，因为随着柔性齿段长度增大，对混料的翻打次数增加，使得更多杂余透过内层筛进入外层筛，由于外层筛筛孔尺寸较小，杂余在外层筛中不易筛出，导致含杂率快速增大。

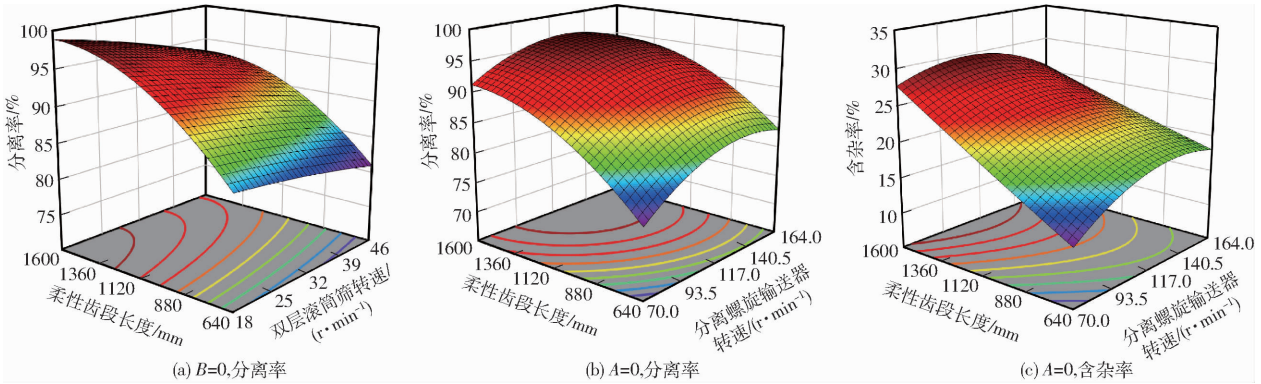


图 10　因素交互作用对试验指标影响的响应曲面

Fig. 10　Response surfaces for effect of factors interaction on test indicators

3.2.4　试验因素最优值组合求解

根据上述试验结果及回归方程，以分离率最大与含杂率最小为优化目标，以双层滚筒筛转速、分离螺旋输送器转速和柔性齿段长度为优化对象，对回归模型进行寻优，其目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(A,B,C) \\ \min Y_2(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \quad (23)$$

最终得到当双层滚筒筛转速为 24.9 r/min、分离螺旋输送器转速为 148.5 r/min、柔性齿段长度为 1 277.8 mm（即钉齿段长度为 1 362.2 mm）时，块茎分离率最大，为 96.23%，含杂率最小，为 25.55%。

4　田间验证试验

为验证果杂分离装置在上述最优参数组合时的作业性能，2022 年 10 月在吉林省农安县油莎豆种植示范基地（44°64′N，124°76′E）开展田间试验（图 11），该基地种植品种为“吉莎 1 号”，种植垄距

为 600 mm,株距为 200 mm,试验前油莎豆植株地上茎叶部分已被去除,留茬高度不超过 120 mm;种植地区土壤为沙壤土,试验前测定 150 mm 深度处土壤坚实度约为 0.38 MPa,土壤含水率约为 10.3%;牵引拖拉机为 WFT-1304 型;其他试验仪器与设备包括铁锹、秒表、电子秤、卷尺、编织袋、物料筛等。



图 11 田间验证试验

Fig. 11 Validation tests in field

为便于果杂分离装置的加工及实际试验的实施,依据仿真结果将 3 个参数取整:双层滚筒筛转速为 25 r/min,分离螺旋输送器转速为 150 r/min,柔性齿段长度为 1 280 mm(即钉齿段长度为 1 360 mm)。将加工的果杂分离装置搭载在 4GQ-1.3-A 型油莎豆收获机上,由拖拉机牵引试验。

试验前,关闭风机电源,并将振动筛筛面用塑料布封盖住,保证内层滚筒筛筛出物料顺利进入编织袋,外层滚筒筛筛出物料顺利进入粮斗,试验参考 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机 试验方法》进行,试验总区域长度为 60 m,前 20 m 为调节拖拉机速度(恒定约 1.15 km/h)与分离装置工作参数的准备区,中间 20 m 为试验测试区,后 20 m 为确保物料完全被分离的停车区。试验后收集编织袋(内层筛排料统计区)和粮箱(外层筛排料统计区)内物料并筛分称量,计算分离率和含杂率,试验进行 3 次,结果取平均值(表 8)。

表 8 验证试验结果

Tab. 8 Validation test results %

试验序号	分离率	含杂率
1	92.24	26.15
2	94.02	27.43
3	93.31	26.37
平均值	93.19	26.65

由表 8 可知,田间验证试验得到最优参数组合下的双层滚筒式果杂分离装置的平均分离率为 93.19%,平均含杂率为 26.65%,分离率实测值与回归模型预测值相对误差为 3.16%,含杂率相对误差为 4.31% ,与回归模型寻优结果基本一致,说明仿真试验较为可靠。

为验证果杂分离装置与清选装置(振筛频率 10.2 Hz、振幅 12 mm、吸杂风机转速 1 450 r/min)联合使用的作业效果,将振动筛上塑料布取下,打开风机电源,仍按照上述方法测试与收集物料。结果得到油莎豆块茎平均分离率为 94.24%、含杂率为 16.68%,与未使用清选装置时相比,分离率提高 1.05 个百分点,含杂率降低 9.97 个百分点。整机作业过程中工作平稳,物料运动流畅,可满足油莎豆收获机的工作要求。

5 结论

(1)针对油莎豆机械化收获过程中油莎豆块茎(果)与土壤草团(杂质)分离不彻底导致收获损失率、含杂率较高的难题,设计了一种双层滚筒筛式果杂分离装置,阐述了其结构及工作原理,通过理论分析,确定了其关键零部件的主要结构和工作参数。

(2)建立了果杂分离装置 EDEM-MBD 耦合仿真模型,以双层滚筒筛转速、分离螺旋输送器转速和柔性齿段长度为试验因素,以块茎分离率、含杂率为评价指标,依据 Box-Behnken 试验原理开展三因素三水平仿真试验,建立了分离率、含杂率与各显著因素之间的回归模型,利用回归模型进行参数寻优,结果表明:当双层滚筒筛转速为 24.9 r/min、分离螺旋输送器转速为 148.5 r/min、柔性齿段长度为 1 277.8 mm 时,块茎分离率最大,为 96.23%,含杂率最小,为 25.55%。

(3)田间试验结果表明:最优参数组合下的双层滚筒筛式果杂分离装置平均分离率为 93.19%,平均含杂率为 26.65%,与回归模型寻优结果基本一致;双层滚筒筛式果杂分离装置与清选装置联合使用时,分离率提高 1.05 个百分点,含杂率降低 9.97 个百分点,可满足油莎豆收获生产需求。

参 考 文 献

[1] WANG L, HU C, GUO W, et al. The effects of moisture content and loading orientation on some physical and mechanical properties of tiger nut[J]. American Journal of Biochemistry and Biotechnology, 2021, 17(1):109-117.

[2] 刘玉兰,王小宁,舒垚,等. 不同产地虎坚果性状及组成分析研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(8):125-129.
LIU Yulan, WANG Xiaoning, SHU Yao, et al. Character and composition of *Cyperus esculentus* from different origins[J]. China Oils Fats, 2020, 45(8): 125-129. (in Chinese)

[3] 何晓宁,张学军,赵壮,等. 反向旋抛式油莎豆起挖装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5):34-43.
HE Xiaoning, ZHANG Xuejun, ZHAO Zhuang, et al. Design and optimisation tests of reverse spin-throwing *Cyperus edulis*

starting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5):34 – 43. (in Chinese)
[4] 张斌, 刘晶, 范仲学, 等. 盐碱地油莎豆机械化播种收获技术与装备研究进展[J]. 山东农业科学, 2019, 51(4):144 – 148.
ZHANG Bin, LIU Jing, FAN Zhongxue, et al. Research progresses of mechanical seeding and harvesting technology and equipment for saline-alkali *Cyperus esculentus*[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(4):144 – 148. (in Chinese)
[5] 李健,刘文亮,张亮,等. 油莎豆收获装备设计与试验[J]. 农业工程, 2022, 12(4):36 – 39.
LI Jian, LIU Wenliang, ZHANG Liang, et al. Design and experiment on harvesting equipment of Cyperus bean[J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(4):36 – 39. (in Chinese)
[6] 何晓宁,张学军,赵壮,等. 基于离散元法的油莎豆降阻挖掘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12):124 – 133.
HE Xiaoning, ZHANG Xuejun, ZHAO Zhuang, et al. Design and test of resistance-reducing excavation device of *Cyperus edulis* based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12):124 – 133. (in Chinese)
[7] HE X, LV Y L, QU Z, et al. Parameters optimization and test of caterpillar self-propelled tiger nut harvester hoisting device [J]. Agriculture,2022,12(7):1060.
[8] WANG J W, LI Z W, HUSSAIN S, et al. Design and threshing outputs study of internal and external rotary roller buckwheat thresher[J]. INMATEH Agricultural Engineering, 2020, 60(1): 173 – 182.
[9] 王升升,陈盼,卢梦晴,等. 大白菜种子收获分离清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2):181 – 190.
WANG Shengsheng, CHEN Pan, LU Mengqing, et al. Design and experiment of separation and cleaning device for Chinese cabbage seeds harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2):181 – 190. (in Chinese)
[10] 万星宇,舒彩霞,徐阳,等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14):27 – 35.
WAN Xingyu, SHU Caixia, XU Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14):27 – 35. (in Chinese)
[11] 彭强吉,李成松,康建明,等. 气力式圆筒筛膜杂分离机改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8):126 – 135.
PENG Qiangji, LI Chengsong, KANG Jianming, et al. Improved design and test on pneumatic cylinder sieve film hybrid separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8):126 – 135. (in Chinese)
[12] YUAN J, WU C, LI H, et al. Movement rules and screening characteristics of rice-threshed mixture separation through a cylinder sieve[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154:320 – 329.
[13] 胡永光,李建钢,陆海燕,等. 等直径滚筒式茶鲜叶分级机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊):116 – 121.
HU Yongguang, LI Jian'gang, LU Haiyan, et al. Design and experiment of equant-diameter roller screening machine for fresh tea leaves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.):116 – 121. (in Chinese)
[14] JEFFERY W S, RODFERS M H, JAMES F S. The place of the trommel in resource recovery[C]// Detroit: National Waste Processing Conference, 1992.
[15] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
[16] 刘协舫,郑晓,丁应生,等. 食品机械[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2002.
[17] 林嘉聪. 蚯蚓堆肥物料特性与蚯蚓-蚯蚓粪分离技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
LIN Jiacong. Research on the characteristics of Vermicompost and Earthworm-Vermicompost separation technology[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[18] 孙洁,尹忠俊,陈兵. 开式螺旋输送原理分析与参数设计[J]. 起重运输机械,2010(5):11 – 16.
[19] 廖庆喜,徐阳,袁佳诚,等. 油菜联合收获机切抛组合式纵轴流脱离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 140 – 150.
LIAO Qingxi, XU Yang, YUAN Jiacheng, et al. Design and experiment on combined cutting and throwing longitudinal axial flow threshing and separating device of rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7):140 – 150. (in Chinese)
[20] 石鑫,牛长河,王学农,等. 滚筒筛式废旧地膜与杂质风选装置设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18):19 – 26.
SHI Xin, NIU Changhe, WANG Xuenong, et al. Design of roller sieve waste plastic film and trash winnowing machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18):19 – 26. (in Chinese)
[21] 陈中玉,关萌,高连兴,等. 两段收获花生螺杆弯齿式轴流摘果装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11):106 – 113.
CEHN Zhongyu, GUAN Meng, GAO Lianxing, et al. Design and test on axial flow peanut picking device with screw bending-tooth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11):106 – 113. (in Chinese)
[22] 徐立章,李耀明. 水稻谷粒冲击损伤临界速度分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8):54 – 57.
XU Lizhang, LI Yaoming. Critical speed of impact damage on a rice kernel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8):54 – 57. (in Chinese)
[23] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8):1329 – 1364.
[24] 张锐,韩佃雷,吉巧丽,等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3):49 – 56.
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):49 – 56. (in Chinese)