doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.05.032

滚筒式花生落果捡拾机设计与试验

郝建军[1,2]　张　影[1]　李兆玮[1]　杨淑华[1]　韩　鹏[3]　郭秀云[4]

(1.河北农业大学机电工程学院,保定 071001;2.河北省智慧农业装备技术创新中心,保定 071001;
3.河北省农业技术推广总站,石家庄 050011;4.滦州市百信花生种植专业合作社,滦州 063799)

摘要:针对花生机械化收获落果损失大且回收困难等问题,设计了一款滚筒式花生落果捡拾机,对其挖掘捡拾装置、升运装置、筛分集果装置进行了设计和相关参数计算。通过对升运装置上果土混合物的受力分析和运动学分析,获得了升运装置中升运单体与升运链间夹角、升运链运行速度的理论值范围。以花生落果捡拾率和含杂率为评价指标,通过对升运装置作业参数单因素和双因素模拟,分析了升运单体与升运链间夹角、升运链运行速度以及二者交互作用对花生升运率和含杂率的影响,获得了最优参数组合为:升运单体与升运链间夹角 45°、升运链运行速度 1.5 m/s。样机田间试验结果表明,花生落果捡拾率为 95%,含杂率为 8.5%,满足整机设计要求。研究结果可为花生落果捡拾技术及装备研发提供参考。

关键词:花生落果;捡拾机;升运装置;滚筒筛;参数优化

中图分类号:S225.7+3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)05-0343-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Drum Type Fallen Peanut Picking Up Machine

HAO Jianjun[1,2]　ZHANG Ying[1]　LI Zhaowei[1]　YANG Shuhua[1]　HAN Peng[3]　GUO Xiuyun[4]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hebei Agricultural University*, *Baoding* 071001, *China*
2. *Technology Innovation Center of Intelligent Agricultural Equipment of Hebei Province*, *Baoding* 071001, *China*
3. *Hebei Agricultural Technology Extension Station*, *Shijiazhuang* 050011, *China*
4. *Luanzhou Baixin Peanut Planting Professional Cooperative*, *Luanzhou* 063799, *China*)

Abstract: A drum type fallen peanut picking up machine was designed to address the issues of excessive fallen peanut and difficulty in recycling after peanut harvest. The excavation and picking device, upward conveying device, screening and collecting device were designed and related parameters were calculated. The current research status and existing problems of fallen peanut picking up machine were introduced, providing ideas and key solutions for future design. Firstly, the entire machine was constructed to determine the main technical parameters of drum type fallen peanut picking up machine and introduce its working principle, then the key devices and parameters were designed and optimized. In the excavation and picking device, the excavation angle and shovel surface width of the excavation shovel were determined, and the structure and material design of the feeding roller and guide grid were carried out. The force analysis and kinematic analysis were conducted on the fallen peanut - soil mixture on the upward conveying device, and the theoretical value range of the angle between the upward conveying monomer and the upward conveying chain, as well as the operating speed of the upward conveying chain, were obtained. Through kinematic analysis of the fallen peanut - soil mixture in the screening and collecting device, the diameter D of the roller screen, the pore width K of the screen mesh, the rotational speed n of the roller screen, and the installation angle of the roller screen were obtained. Through EDEM simulation analysis, the angle between the upward conveying monomer and the upward conveying chain, speed of the upward conveying chain, the leakage and lifting situation of two factors were observed. Using pick up rate and trash content as evaluation indicators, through single factor and double factor simulation analysis of upward conveying device operation parameters, the angle between the upward conveying monomer and the upward conveying chain, the running speed of upward conveying chain, and the impact

收稿日期:2024-03-20　修回日期:2024-04-10

基金项目:河北省现代农业产业技术体系建设专项资金项目(HBCT2024040207)

作者简介:郝建军(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化自动化技术及装备研究,E-mail:hjjpaper@163.com

of their interaction on peanut lifting efficiency and trash content were clarified. The optimal parameter combination was obtained as follows: the angle between the upward conveying monomer was 45°, upward conveying chain running speed was 1.5 m/s. According to the preliminary design, peanut varieties were pre-picked, and field tests were conducted after measuring the soil moisture content and the distribution of fallen peanut. The field test results of the prototype showed that the pick up rate of the whole machine was 95%, and the trash content was 8.5%, which met the design requirements of the whole machine.

Key words: fallen peanut; picking up machine; upward conveying device; roller screen; parameter optimization

0 引言

花生是我国最具经济价值的油料作物之一[1]。花生机械化收获的应用及普及对促进我国花生产业发展具有重要作用[2-3],但花生机械化收获普遍存在落果损失大的问题[4]。据统计,花生机械化收获后落果损失高达 609 ~ 1 371 kg/hm^2,其中约 75% 的花生落果散落在地表,约 25% 的花生落果遗留在地表下 100 mm 内的浅土层[3-8]。为减小花生机械化收获损失,落果捡拾已成为业内普遍关注的问题。

目前,花生落果回收大多由人工完成,捡拾率低、劳动强度大,难以满足花生日益壮大的规模化种植需求。为减少花生机械收获损失,科研工作者对花生机收落果捡拾开展了卓有成效的研究。已有研究成果[8-12]虽在一定程度上缓解了花生落果捡拾无机可用的现状,但仍存在花生落果捡拾率低、落果含杂率高、机器对土壤适应性差等问题[13]。本文设计一款兼顾花生落果捡拾率与落果含杂率的滚筒式花生落果捡拾机,并对其挖掘捡拾、升运、筛分等关键装置进行设计和相关参数计算,旨在进一步提高花生落果捡拾率、降低落果含杂率,为其它根茎类作物收获机械研制提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

滚筒式花生落果捡拾机,主要由挖掘捡拾装置、T 型螺旋锥齿轮转向箱、机架、三点悬挂装置、升运装置、筛分装置、集果装置、行走轮等组成,如图 1 所示。其中,挖掘捡拾装置由挖掘铲、拨料辊、限深轮等构成;升运装置由升运单体、从动链轮、连接板、升运链、主动链轮、升运链传动轴等构成;筛分装置由滚筒筛、螺旋输送器、转动轴、连接轴、锥齿轮等构成;集果装置由集果箱及其两侧挡板构成。整机主要设计参数如表 1 所示。

1.2 工作原理

滚筒式花生落果捡拾机通过三点悬挂装置与拖拉机挂接,拖拉机动力输出轴将动力输送给 T 型螺旋锥齿轮转向箱。转向箱采用双边传动,一边采用链传动带动升运链、拨料辊工作,最终将挖掘捡拾装置挖掘出来的果土混合物通过拨料棍、升运装置运送至滚筒筛。另一边通过带传动、链传动及锥齿轮传动带动滚筒筛转动。

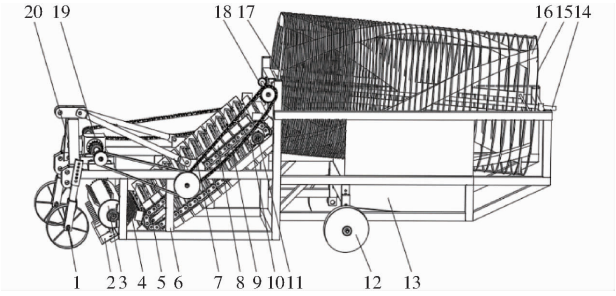


图 1 滚筒式花生落果捡拾机结构示意图

Fig. 1 Schematic of structure of drum type fallen peanut picking up machine

1. 限深轮 2. 挖掘铲 3. 拨料辊 4. 导料栅条 5. 从动链轮 6. 机架 7. 升运单体 8. 连接板 9. 升运链 10. 主动链轮 11. 升运链传动轴 12. 行走轮 13. 集果箱 14. 转动轴 15. 滚筒筛 16. 螺旋输送器 17. 连接轴 18. 锥齿轮 19. T 型螺旋锥齿轮转向箱 20. 三点悬挂装置

表 1 滚筒式花生落果捡拾机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of drum type fallen peanut picking up machine

参数	数值/型式
整机尺寸(长 × 宽 × 高)/(mm × mm × mm)	3 900 × 1 300 × 1 700
作业型式	牵引式
挖掘深度/mm	≤100
作业幅宽/mm	1 000
捡拾率/%	≥90
落果含杂率/%	≤15

捡拾作业前,可根据田间实际情况,通过限深轮调整挖掘铲入土深度。捡拾作业时,捡拾机在拖拉机牵引下前行,挖掘铲将花生落果、土石块、残膜、秧蔓、杂草等铲起,通过拨料辊的转动将果土混合物拨送到挖掘铲后方的导料栅条上,部分细小的土石块、残膜等通过导料栅条中的缝隙漏掉。剩余的果土混合物通过升运装置被运送到滚筒筛中。为达到最佳筛分效果,滚筒筛前段尺寸设计为小于花生落果最小三轴尺寸,以便于将小于花生落果最小三轴尺寸

的土石块、秧蔓、残膜、杂草等筛落。滚筒筛是以一定角度安装的，果土混合物在经过滚筒筛前段筛选后会由于自身重力向下运动进入滚筒筛的中后段再次筛分，滚筒筛中段是花生落果被筛分出来的关键阶段，为此根据花生的三轴尺寸设计了 3 种不同尺寸的筛孔确保不同尺寸的花生落果都被筛分出来。滚筒筛后段筛孔尺寸设计为大于花生落果最大三轴尺寸，较大的土石块、秧蔓在滚筒筛网后段筛出撒落在地表。集果箱底部采用小于花生落果最小三轴尺寸孔径的筛网，可通过机器作业时自身振动对落果中的细小土壤、石块等再次筛分。

2　关键装置及参数设计

本文以冀花 915 品种花生为参考进行设计。冀花 915 花生果实三轴尺寸为：长 26.74 ~ 36.34 mm，宽 11.17 ~ 14.41 mm，厚 11.62 ~ 15.76 mm。实际作业时，可通过调整或更换导料栅条间距、滚筒筛孔隙宽度、集果箱底板筛孔宽度以满足不同花生落果捡拾需求。

2.1　挖掘捡拾装置

挖掘捡拾装置（图 2）主要由挖掘铲、拨料辊、导料栅条、安装架及限深轮等构成，其主要功能是将果土混合物掘出，并将其输送到升运装置[14-15]。挖掘铲将花生落果、土石块、残膜、秧蔓、杂草等果土混合物铲起；拨料辊可将铲面上的果土混合物向后拨送至导料栅条；导料栅条将果土混合物中的部分土壤石块等分离出去；安装架用于安装挖掘铲和导料栅条，安装架选用 1 000 mm × 60 mm × 40 mm 方管。限深轮通过限深轮固定板上的 3 个孔位与机架限位板上的 6 个孔位中的其中 3 个孔位通过螺栓螺母链接来固定限深轮，作业前可通过上下移动限深轮来调节作业高度进而调整挖掘深度。

2.1.1　挖掘铲

为减小应力集中，避免弯矩过大导致挖掘铲变形，挖掘铲采用三段组合式平面单铲，如图 3 所示，L_1为铲面宽度，mm；L_2为安装架宽度，mm；L_3为导料栅条长度，mm；L_4 为导料栅条相邻间距，mm；S 为挖掘铲总长度，mm；θ 为挖掘铲入土角，(°)；α 为导料栅条与安装架角度，(°)；h_1为最大挖掘深度，mm；h_2为导料栅条垂直高度，mm。挖掘铲由厚度为 6 mm 的 65Mn 钢板切割而成并经淬火 + 回火处理，其总长度为 1 000 mm。

挖掘铲入土角是影响挖掘效果的主要因素[16-17]。挖掘铲入土角越大，所需挖掘力越大且易壅土；挖掘铲入土角越小，挖掘阻力越小，但入土深度不够，容易造成遗落在土壤中的花生落果被漏挖。

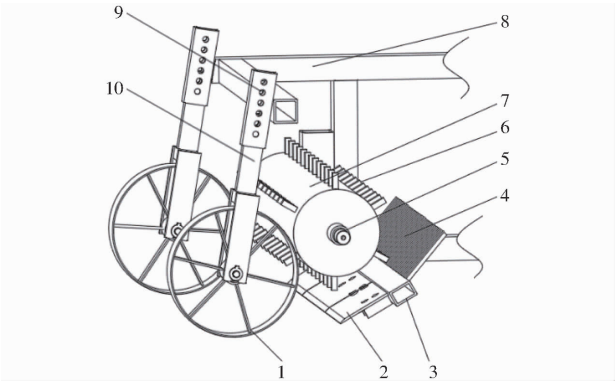


图 2　挖掘捡拾装置示意图

Fig. 2　Schematic of excavation and picking up device

1. 限深轮　2. 挖掘铲　3. 安装架　4. 导料栅条　5. 拨料辊轴　6. 拨料叉　7. 拨料辊套筒　8. 机架　9. 机架限位板　10. 限深轮固定板

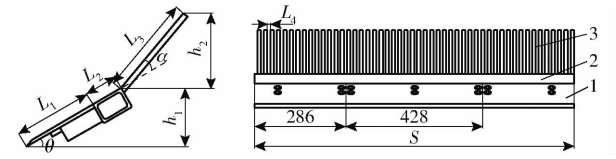


图 3　挖掘铲示意图

Fig. 3　Schematic of excavation shovel

1. 挖掘铲　2. 安装架　3. 导料栅条

参考相关经验做法并结合预试验，设定挖掘铲入土角 $\theta = 30°$，最大挖掘深度 $h_1 = 100$ mm。

挖掘铲铲面宽度 L_1对果土混合物升运率具有重要影响。铲面宽度太小，掘土能力差，机器作业效率低；铲面宽度太大，挖掘阻力增大且易壅土。铲面宽度 L_1计算式为

$$L_1 = \frac{h_1}{\sin\theta} - L_2 \tag{1}$$

可得铲面宽度 $L_1 = 140$ mm。

2.1.2　拨料辊

拨料辊主要由拨料辊轴、拨料叉、拨料辊套筒等构成，均匀分布的 6 行拨料叉焊接在拨料辊套筒圆周上，相邻两行的拨料叉交错分布，如图 4 所示。拨料辊转动可将铲面上的果土混合物经导料栅条向后拨送至升运装置。结合整机结构尺寸及预试验，拨料辊套筒选用直径 $\Phi_1 = 219$ mm，厚度 $\varepsilon = 3$ mm，长度 $C = 945$ mm 的圆筒，拨料叉选用 14 mm × 14 mm × 40 mm 方钢。机架上预设长圆孔，拨料辊通过拨料辊轴与安装在机架长圆孔上的轴承连接。作业时，可沿长圆孔移动轴承座来调整拨土辊与铲面的间距，以适应不同挖掘深度和动土量作业需求，从而解决壅土问题。

2.1.3　导料栅条

导料栅条作用：①将挖掘的果土混合物输送至升运装置。②将部分细小的土石块、残膜等通过导

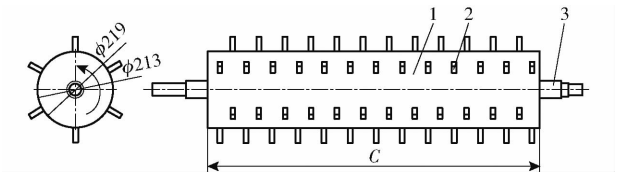


图 4 拨料辊示意图

Fig. 4 Schematic of feeding roller

1. 拨料辊套筒 2. 拨料叉 3. 拨料辊轴

料栅条中的缝隙漏掉。导料栅条选用直径 Φ_2 = 10 mm 的圆钢,并被等间距安装在挖掘铲后端。为提升碎土和漏土能力,导料栅条间距可稍大些,但同时要避免捡拾起的花生落果被再次漏掉。以冀花 915 花生果实最小三轴尺寸为参考进行设计,为此导料栅条相邻间距 L_4 = 10 mm,如图 5 所示。

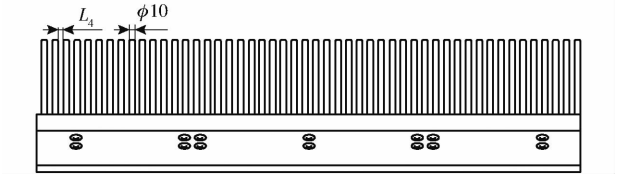
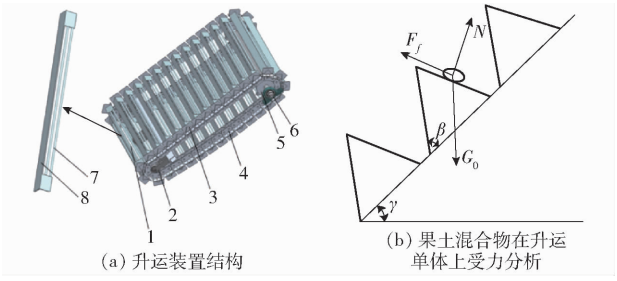


图 5 导料栅条示意图

Fig. 5 Schematic of guide grid

2.2 升运装置及升运单体结构参数设计

升运装置的主要功用是将挖掘捡拾装置铲起的果土混合物输送至滚筒筛中。升运装置(图 6a 所示)主要由升运单体、连接板、从动链轮、升运链、主动链轮、升运链传动轴等构成,升运单体由倾斜挡板和圆钢拼焊而成。升运单体两端焊接连接板,连接板通过螺栓与链条连接。



(a) 升运装置结构 (b) 果土混合物在升运单体上受力分析

图 6 升运装置结构及果土混合物在升运装置上受力分析示意图

Fig. 6 Schematics of structure of upward conveying device and force analysis of fallen peanut-soil mixture on upward conveying device

1. 升运单体 2. 从动链轮 3. 连接板 4. 升运链 5. 主动链轮 6. 升运链传动轴 7. 圆钢 8. 倾斜挡板

2.2.1 果土混合物在升运单体上的受力分析

根据整机尺寸并结合预试验,设定升运装置升运角 γ = 40°。为避免升运过程中果土混合物下滑。对升运装置上的果土混合物进行受力分析(图 6b)。

为保证果土混合物正常升运,应满足条件

$$N = G_0\cos(\beta - 40°) \tag{2}$$

$$F_f \geqslant G_0\sin(\beta - 40°) \tag{3}$$

$$F_f = \mu N \tag{4}$$

式中 N——果土混合物在升运单体上所受的支持力,N

F_f——果土混合物所受摩擦力,N

μ——果土混合物与升运单体之间的摩擦因数,取 0.51[18]

G_0——果土混合物所受重力,N

β——升运单体与升运链间夹角,(°)

由式(2)~(4)可得

$$\beta \leqslant \arctan\mu + 40° \tag{5}$$

计算得升运单体与升运链间夹角 $\beta \leqslant 67°$。

2.2.2 果土混合物在升运单体上的运动学分析

果土混合物在升运单体上的运行状态可能分为 2 种:果土混合物落在升运单体的倾斜挡板区域和果土混合物落在升运单体的圆钢区域。

升运单体在升运链的带动下,位于倾斜挡板区域的果土混合物将被抛起,抛起时的速度等于果土混合物在倾斜挡板处的线速度,以平行于升运角为 x 轴,建立坐标系。忽略空气阻力的影响,从 x 轴方向上来看,在升运单体上的果土混合物做的是具有一定初速度的匀速直线运动;从 y 轴方向上来看,果土混合物从抛起至到达最高处做的是匀减速运动,然后做匀加速运动。果土混合物在升运单体上抛送轨迹如图 7 所示。

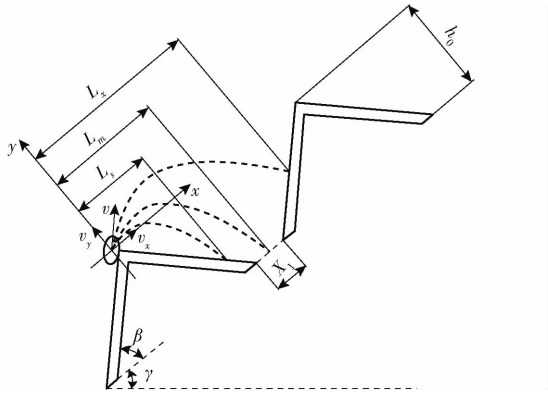


图 7 果土混合物在升运单体上抛送轨迹

Fig. 7 Throwing trajectory of fallen peanut-soil mixture on upward conveying monomer

1. 圆钢 2. 倾斜挡板

果土混合物抛起后与升运单体碰撞的位置可分为:①与升运单体的圆钢产生碰撞,果土混合物的抛送距离为 L_s。②落在 2 个升运单体的间隙处,果土混合物抛送距离为 L_m,为避免花生荚果从间隙中漏掉,因此设置相邻两个单体距离 X_1 = 10 mm。③落在相邻升运单体的倾斜挡板上,果土混合物的抛送距离为 L_x。果土混合物在抛起时水平和竖直方向

分速度 v_x、v_y分别为

$$v_x = v\cos\beta \tag{6}$$

$$v_y = v\sin\beta - gt \tag{7}$$

式中　g——重力加速度，m/s^2

t——果土混合物抛起后运行时间，s

v——果土混合物运行速度，m/s

果土混合物抛起后在水平和竖直方向位移为

$$x = vt\cos\beta \tag{8}$$

$$y = vt\sin\beta - \frac{1}{2}gt^2 \tag{9}$$

果土混合物自抛起后，在竖直方向上最大距离 h 为

$$h = \frac{v^2\sin\beta}{2g} \tag{10}$$

果土混合物与升运单体不同的接触位置影响着果土混合下降高度和接触时速度。果土混合物被抛掷到最大高度时，它在竖直方向上分速度 $v_y = 0$，之后做匀加速运动，下降总高度为 $h + h_0$，h_0为升运单体自身高度，果土混合物从抛起至到达最高点的用时 t_s为

$$t_s = \frac{v\sin\beta}{g} \tag{11}$$

因此，在 h_1高度范围内，果土混合物运动时间为 $2t$，抛掷距离 L_0为

$$L_0 = \frac{v^2\sin^2\beta}{g} \tag{12}$$

根据上述分析可知，抛送距离 L_0主要与升运单体与升运链间夹角 β、升运链运行速度 v 有关。抛送距离 L_0与夹角 β、运行速度 v 成正比。抛送距离过大，会产生较大的冲击力；抛送距离过小，容易出现卡果现象。经计算，最终确定运行速度 v 为 0.5 ~ 2.5 m/s。

2.3　筛分集果装置

筛分集果装置由滚筒筛、螺旋输送器、转动轴、连接轴、锥齿轮、集果箱、挡板等构成，如图 8 所示，图中 K_1、K_2、K_3为筛网孔隙宽度，其作用是通过筛体运动对果土混合物进行分离，然后将筛分完成后的花生落果收集到集果箱内。筛分集果装置性能对整机捡拾率和含杂率具有重要影响。

2.3.1　筛分装置

滚筒筛直径 D、筛网孔隙宽度 K、滚筒筛转速 n、滚筒筛安装角 δ 等是影响筛分集果效果的主要因素。

(1)滚筒筛直径 D。果土混合物从升运装置抛掷到滚筒筛时的抛掷高度直接影响滚筒筛的安装位置，对果土混合物进行运动学分析，如图 9 所示。图中 d 为锥齿轮直径。滚筒筛直径 D 设计主要依据挖掘捡拾装置和升运装置的作业宽度与滚筒筛的安装位置，如图 10 所示。

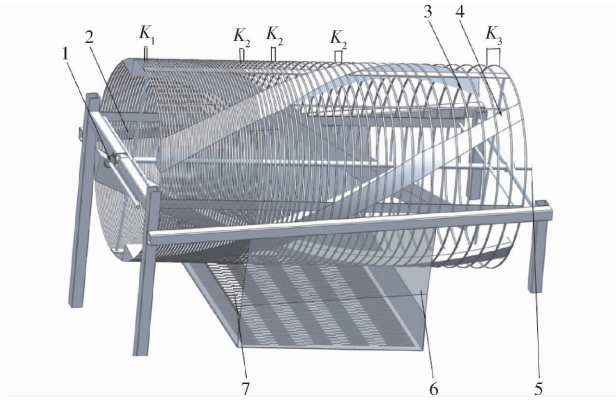


图 8　筛分装置结构示意图

Fig. 8　Structure diagram of screening device

1. 锥齿轮　2. 连接轴　3. 滚筒筛　4. 螺旋输送器　5. 转动轴　6. 挡板　7. 集果箱

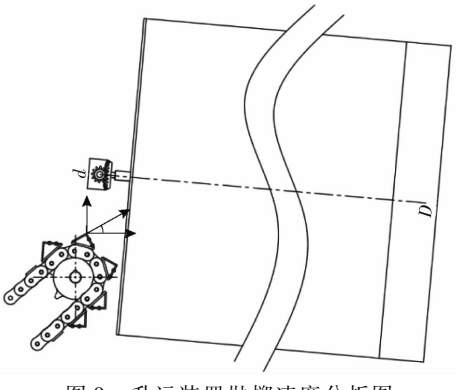


图 9　升运装置抛掷速度分析图

Fig. 9　Throwing velocity analysis diagram of upward conveying device

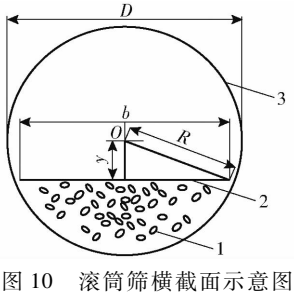


图 10　滚筒筛横截面示意图

Fig. 10　Schematic of cross-section of roller screen

1. 花生荚果　2. 滚筒筛内果土混合物的最高位置　3. 滚筒筛内径

对点 a 速度 v_a进行水平方向和垂直方向的分解，即 v_{ax}和 v_{ay}分别为

$$\begin{cases} v_{ax} = v_a\cos\beta \\ v_{ay} = v_a\sin\beta \end{cases} \tag{13}$$

根据上文计算得知 $\beta \leqslant 67°$，v_a取值范围为 [0.5 m/s，2.5 m/s]，取中间最优值，v_a = 1.5 m/s。当 $\beta = 0°$时，v_{axmax} = 1.5 m/s，$v_{aymin} = 0$，当 $\beta = 67°$时，v_{axmin} = 0.59 m/s，v_{aymax} = 1.38 m/s。果土混合物被抛掷起时最大高度 h_{amax}计算式为

$$h_{amax} = \frac{v_{aymax}^2}{2g} \tag{14}$$

由式(13)、(14)计算可得高度 $h_a=97$ mm。为防止土壤进入转动轴上的锥齿轮,加大阻力,损伤机器,滚筒筛的中心至升运装置最高点预留一定间隙 y

$$y=h_a+\frac{d}{2} \tag{15}$$

$$R\geqslant\sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2+y^2} \tag{16}$$

$$D=2R \tag{17}$$

式中 R——滚筒筛半径,mm

b——升运装置升运宽度,mm

为满足传动系统要求,选择锥齿轮直径 $d=140$ mm,故间隙 $y=167$ mm,预留 10 mm 的安全距离,圆整处理后间隙 $y=180$ mm。根据挖掘捡拾装置整体尺寸确定升运装置升运宽度 $b=930$ mm,由式(16)、(17)计算可得滚筒直径 $D=1\,044$ mm。

(2)筛网孔隙宽度 K。采用分级式滚筒筛,对果土混合物进行逐级筛分,滚筒筛孔隙宽度 K 逐级递增。第 1 级用于筛落小颗粒土壤石块,孔隙宽度 K_1 要小于花生荚果的三轴尺寸;第 2 级主要用于筛落花生荚果;第 3 级用于筛落大颗粒土块、秧蔓及杂草等。结合本文预捡拾品种冀花 915 花生果实三轴尺寸,确定 3 级间隙宽度为:$K_1=10$ mm、10 mm$\leqslant K_2\leqslant$40 mm、$K_3=45$ mm,其中为保证对花生落果的充分筛选,因此 K_2 设置不同的间隙,来降低含杂率,其中包括 17、27、37 mm 3 种间隙,对花生荚果进行充分筛分。

(3)滚筒筛转速 n。滚筒筛转速直接影响果土混合物在滚筒筛内的运动轨迹,从而对筛分效果具有重要影响。果土混合物运动轨迹如图 11 所示。

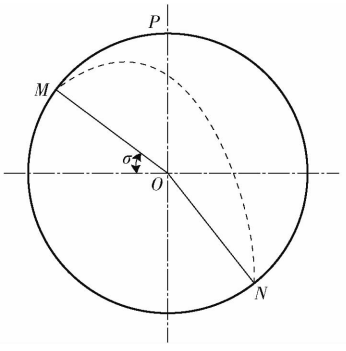


图 11 果土混合物运动轨迹

Fig. 11 Movement trajectory of fallen peanut-soil mixture

假设果土混合物运动至点 M 时脱离筛网做抛物线运动,滚筒筛转速 n 与脱离角 σ 关系式为

$$n=\frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{g\sin\sigma}{R}} \tag{18}$$

式中 σ——脱离角,(°)

当脱离角 $\sigma=90°$时,果土混合物运动到点 P,此时滚筒转速达到最大临界值,得到转速临界值 $n=42$ r/min。

(4)滚筒筛安装角 δ。果土混合物在筛分过程中需逐渐向后下方移动,故滚筒筛应斜置安装如图 12 所示。

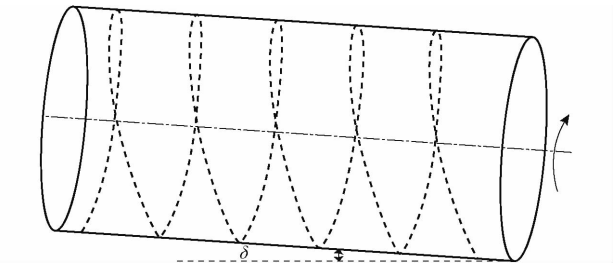


图 12 果土混合物受力及运动轨迹

Fig. 12 Force and motion trajectory of fallen peanut-soil mixture

果土混合物在滚筒内连续运动时,运动轨迹近似螺旋线(图 12),相邻 2 次的落点不在同一位置,沿轴线方向有一定距离 S_t,如图 13 所示,距离 S_t 与滚筒直径 D 和安装角 δ 关系式为

$$S_t=D\tan\delta \tag{19}$$

为了确保果土混合物进行充分筛分,距离 S_t 应大于滚筒筛格宽度,计算确定滚筒筛安装角 $\delta=5°$。

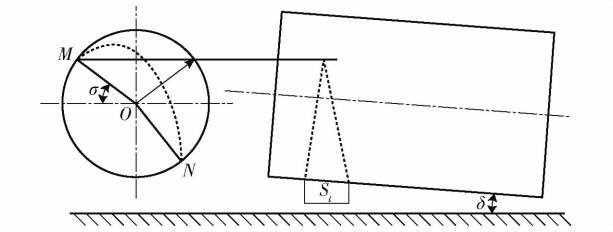


图 13 滚筒筛物料运动轨迹

Fig. 13 Trajectory of material movement of roller screen

2.3.2 集果装置

集果箱主要是用来收集果土混合物经过筛选后的花生落果和未被筛分出去的土石块、残膜、秧蔓、杂草等杂物。通过集果箱中的花生和杂物来计算捡拾机工作后捡拾花生含杂率。集果装置由集果箱和两侧挡板构成,两侧挡板作用是防止筛分装置中滚筒筛转动时花生落果飞溅,如图 14 所示。集果箱底板采用筛孔型底板,利用花生落果捡拾机工作时产生的震动,对集果箱内的花生落果进行再次筛分,集果箱底板的筛孔宽度小于花生落果最小三轴尺寸,集果箱底板筛孔宽度为 10 mm。

3 基于 EDEM 的升运装置优化

升运装置作为根茎类作物收获机械的核心部件,其作业效果直接影响整机的作业性能[19-25]。为使升运装置性能达到最佳,采用 EDEM 进行仿真试验,通过单因素仿真确定各因素对升运效果的影响。在单因素仿真基础上,进行两因素三水平正交试验,

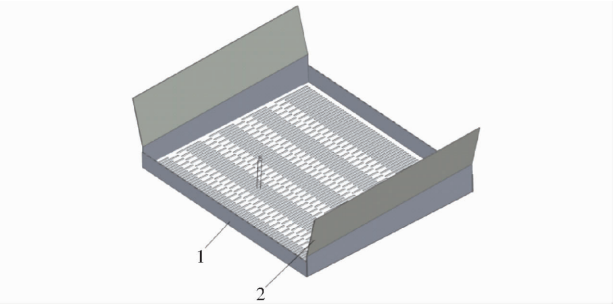


图 14　集果装置结构示意图

Fig. 14　Schematic of peanut collecting device structure

1. 集果箱　2. 挡板

以确定最优参数组合。

3.1　仿真模型建立及仿真参数确定

为简化仿真模型、提高仿真效率，忽略秧蔓、残膜、杂草等对仿真的影响[26]。花生、土壤、升运单体为 3 个不同类型、不同属性的个体，花生具有粘弹特性，土壤具有激振解聚特征，升运单体具有刚性特征。花生荚果的外形属于不规则体，常规的测量建模无法还原其真实特征，为提高仿真真实性[27]，选取预捡拾花生品种冀花 915，运用三维扫描技术，对花生荚果外形轮廓进行扫描，得到花生荚果三维模型，并将其导入到 EDEM 软件中，使用自动填充方法得到花生荚果离散元模型；考虑到土壤颗粒间粘结力，采用 Hertz－Mindlin with bonding 接触模型，设置 2 种类型土壤颗粒。为便于观察升运装置漏土效果，另设置一种小颗粒土壤，颗粒半径设置为 3 mm，小于相邻 2 个升运单体间隙 X_4、2 个圆钢间隙 X_3；采用颗粒替换方法由多种小颗粒黏结在一起后生成土块，尺寸需要大于相邻 2 个升运单体的间隙 X_4、2 个圆钢间隙 X_3，同时参照田间实际土块尺寸，将大颗粒土壤半径设为 12 mm。根据文献[28－29]确定模型参数，如表 2、3 所示。

表 2　土壤、花生以及升运单体参数

Tab. 2　Soil, peanut and combined upward conveying monomer parameters

材料	泊松比	密度/(kg·m^{-3})	剪切模量/MPa
土壤	0.25	1 210	1
花生荚果	0.40	465.08	6.5
升运单体	0.28	7 800	3.1×10^5

表 3　不同材料接触参数

Tab. 3　Contact parameters of different materials

材料	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
土壤-土壤	0.20	0.25	0.04
土壤-花生荚果	0.06	0.50	0.01
花生荚果-花生荚果	0.287	0.823	0.283
土壤-升运单体	0.10	0.20	0.02
花生荚果-升运单体	0.275	0.583	0.104

3.2　评价指标

升运装置仿真试验以含杂率 Y_1 和花生升运率 Y_2 为评价指标。含杂率 Y_1 为升运后果土混合物中土壤质量占果土混合物比例，花生升运率 Y_2 为升运完成后花生相较于升运前花生质量占比。颗粒工厂中产生的土壤颗粒总质量为 W_0，花生质量为 N_0，升运完成后土壤颗粒质量为 W_1，花生质量为 N_1。Y_1、Y_2 计算式为

$$Y_1=\frac{W_1}{W_1+N_1}\times100\% \tag{20}$$

$$Y_2=\frac{N_1}{N_0}\times100\% \tag{21}$$

3.3　单因素试验

按照上述参数设定仿真模型，通过 EDEM 仿真分析，观察升运单体与升运链间夹角 β、升运链运行速度 v 2 个因素的漏土和升运情况，升运单体与升运链间夹角 $\beta\leqslant67°$，通过结合预试验，选定 23°为最小夹角，取 23°、34°、45°、56°、67°，升运链运行速度取 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5。

验证上述一种因素时，另一种因素选用中间水平，分别考察各个因素对含杂率和升运率的影响。单因素重复试验结果如图 15、16 所示。

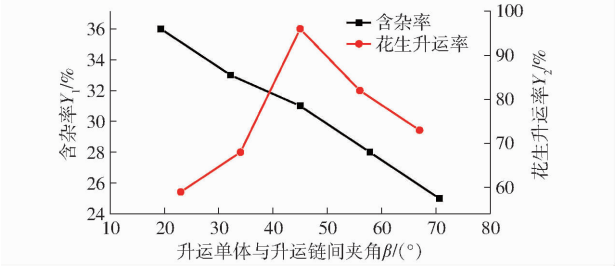


图 15　不同升运单体与升运链间夹角时升运性能曲线

Fig. 15　Lifting condition of different angles between upward conveying monomer and upward conveying chain

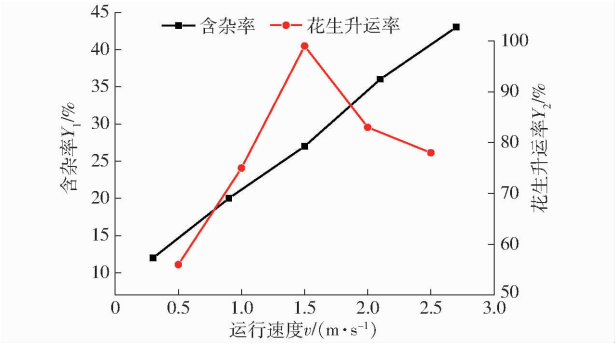


图 16　升运链不同运行速度时升运性能曲线

Fig. 16　Lifting situation of upward conveying chain at different operating speeds

由图 15 可知，随着升运单体与升运链间夹角 β 增大，升运装置含杂率降低，花生升运率先增大后减小；由图 16 可知，随着升运链运行速度 v 增大，升运

装置含杂率增大,花生升运率先增大后减小。

3.4 两因素三水平试验及方差分析

正交试验及方差分析一般用于分析多种因素交互影响,从而判断出因素对试验指标影响的显著性,为求最优参数组合提供参考[29-31]。选取对升运装置影响较大的升运单体与升运链间夹角、升运链的运行速度作为试验因素,试验以含杂率 Y_1、花生升运率 Y_2作为指标进行试验,试验因素编码见表 4,试验结果如表 5 所示。对两因素三水平试验结果进行方差分析,结果如表 6 所示。

表 4 试验因素编码

Tab.4 Factors and codes of experiment

编码	因素	
	升运单体与升运链间夹角 β/(°)	升运链运行速度 v/(m·s^{-1})
-1	23	0.5
0	45	1.5
1	67	2.5

表 5 试验方案与结果

Tab.5 Experimental plan and results

序号	因素		Y_1/%	Y_2/%
	β/(°)	v/(m·s^{-1})		
1	23	0.5	21.95/22.03/22.32	69/67/71
2	23	1.5	33.98/34.05/34.02	84/85/85
3	23	2.5	49.37/48.67/50.01	72/71/75
4	45	0.5	5.04/4.98/5.87	84/85/84
5	45	1.5	30.02/29.78/29.68	98/97/99
6	45	2.5	44.54/45.02/44.01	97/96/95
7	67	0.5	2.95/3.14/3.45	45/44/47
8	67	1.5	27.34/28.21/29.98	66/64/68
9	67	2.5	43.25/42.68/45.02	62/60/64

表 6 两因素三水平重复试验方差分析

Tab.6 Variance analysis of two-factor three-level repeated trials

项目	差异来源	平方和	均方	F	P
含杂率	β	530.945	265.473	544.99	<0.000 1**
	v	5 764.758	2 882.379	5 917.248	<0.000 1**
	βv	220.016	55.004	112.918	<0.000 1**
花生升运率	β	5 512.667	2 756.333	1 162.828	<0.000 1**
	v	1 282.667	641.333	270.562	<0.000 1**
	βv	168	42	17.719	<0.000 1**

注:** 表示极显著($P<0.01$)。

由表 6 可知,升运单体与升运链间夹角和升运链的运行速度 2 个因素对升运装置含杂率和升运率均具有极显著影响($P<0.01$)。通过两因素三水平试验结果可知,当升运单体与升运链间夹角 β 为 45°、升运链运行速度 v 为 1.5 m/s 时,升运装置达到最佳效果,含杂率约为 29.3%,花生升运率为 98%。

4 田间试验

滚筒式花生落果捡拾机制作完成后,为进一步验证整机的可靠性,进行田间试验。2023 年 9 月 23 日在河北省保定市涞水县王村镇吴各庄村进行田间试验。试验田种植的花生品种为冀花 915。田间试验前 1 ~ 2 d 试验田完成了花生机收,图 17 为试验田经过花生机收后地表花生落果分布状态。测得试验田土壤含水率约为 20%,经过九点取样法,统计出该地块单位面积地块落果损失质量为 75 kg,约 75% 的花生落果散落在地表,将近 25% 的花生落果遗留在 100 mm 内的浅土层内。



图 17 收获后花生落果分布状态

Fig.17 Distribution status of fallen peanut after harvest

拖拉机牵引动力为 51.48 kW,行驶速度为 0.8 m/s。试验现场如图 18 所示。



图 18 田间试验场景

Fig.18 Field test

每组试验和取样重复 3 次,计算花生落果含杂率 P_1、花生捡拾率 P_2平均值。每组试验后,统计区域内残留的花生落果质量 J_1,然后称量集果箱内花生果土混合物质量 J_2,再筛选出花生落果并称量花生落果质量 J_3,试验统计结果如表 7 所示,花生落果含杂率 P_1、花生捡拾率 P_2计算式为

表 7 田间试验数据

Tab.7 Field trial data

试验序号	J_1/kg	J_2/kg	J_3/kg	试验指标	
				含杂率/%	花生捡拾率/%
1	0.46	11.84	10.94	7.6	96
2	0.76	11.17	10.14	9.2	93
3	0.66	11.33	10.34	8.7	94
平均值				8.5	95

$$P_1 = \frac{J_2 - J_3}{J_2} \times 100\% \quad (22)$$

$$P_2 = \frac{J_3}{J_1 + J_3} \times 100\% \quad (23)$$

试验测算结果如表 7 所示。由表 7 可知，作业后含杂率 P_1 平均值为 8.5%，花生捡拾率 P_2 平均值为 95%，满足机具设计要求。

5　结论

（1）基于花生落果分布及整机作业要求，确定了滚筒式花生落果捡拾机的整机方案，及其整机尺寸为 3 900 mm × 1 300 mm × 1 700 mm，牵引式作业形式，挖掘深度 100 mm 以内，花生捡拾率大于 90%，含杂率低于 15%。

（2）依据花生落果捡拾机的整机方案设计，对挖掘捡拾装置、升运装置、筛分集果装置进行了设计和相关参数计算，设计了一种由固定式平面铲与栅条组合而成的挖掘铲，同时对升运单体、拨料辊、滚筒筛、集果箱结构进行了具体的结构设计。

（3）利用 EDEM 软件对升运装置的工作过程进行模拟，以升运单体与升运链间夹角 β、升运链的运行速度 v 为试验因素，以花生升运率和含杂率为试验指标，进行单因素和双因素试验。得到最优参数组合为：升运单体与升运链间夹角为 45°，升运链运行速度 1.5 m/s，此时升运装置花生升运率为 98%，含杂率为 29.3%。

（4）样机田间试验结果表明，整机含杂率平均值为 8.5%，花生捡拾率平均值为 95%，满足整机的设计要求。

参　考　文　献

[1] 郝建军，秦家辉，杨淑华，等. 勺夹式花生小区单粒精量播种单体设计与试验[J]. 农业工程学报，2023，39(3)：33－41.
HAO Jianjun，QIN Jiahui，YANG Shuhua，et al. Design and experiments of a precision sowing unit with the spoon clip for single peanut seed planting in plot[J]. Transactions of the CSAE，2023，39(3)：33－41.（in Chinese）

[2] 王瑞元. 我国花生生产、加工及发展情况[J]. 中国油脂，2020，45(4)：1－3.
WANG Ruiyuan. Peanut production，processing and development in China[J]. China Oils and Fats，2020，45(4)：1－3.（in Chinese）

[3] 陆永光，吴努，王冰，等. 花生荚果碰撞模型中恢复系数的测定及分析[J]. 中国农业大学学报，2016，21(8)：111－118.
LU Yongguang，WU Nu，WANG Bing，et al. Measurement and analysis of peanuts' restitution coefficient in point-to-plate collision mode[J]. Journal of China Agricultural University，2016，21(8)：111－118.（in Chinese）

[4] 王伯凯，胡志超，曹明珠，等. 轴流式花生捡拾收获机设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(1)：109－118，98.
WANG Bokai，HU Zhichao，CAO Mingzhu，et al. Design and test of axial-flow peanut picking and harvesting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(1)：109－118，98.（in Chinese）

[5] 陈有庆，胡志超，王申莹，等. 割秧后花生收获机捡拾装置设计与试验[J]. 农业工程学报，2020，36(16)：1－8.
CHEN Youqing，HU Zhichao，WANG Shenying，et al. Design and experiments of pickup device of peanut harvester after cutting peanut straws[J]. Transactions of the CSAE，2020，36(16)：1－8.（in Chinese）

[6] 周德欢，胡志超，曹明珠，等. 两段式花生摘果特性试验研究[J]. 农机化研究，2017，39(6)：183－187.
ZHOU Dehuan，HU Zhichao，CAO Mingzhu，et al. Study on properties of two-step type peanut stripping[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2017，39(6)：183－187.（in Chinese）

[7] 关萌，沈永哲，高连兴，等. 花生起挖晾晒后的果柄机械特性[J]. 农业工程学报，2014，30(2)：87－93.
GUAN Meng，SHEN Yongzhe，GAO Lianxing，et al. Mechanical properties of peanut peg after digging and drying[J]. Transactions of the CSAE，2014，30(2)：87－93.（in Chinese）

[8] 郝建军，朱志民，李玲，等. 牵引式花生落果捡拾复收机设计与试验[J]. 河北农业大学学报，2023，46(1)：110－120.
HAO Jianjun，ZHU Zhimin，LI Ling，et al. Design and experiment of traction peanut secondary harvester[J]. Journal of Hebei Agricultural University，2023，46(1)：110－120.（in Chinese）

[9] 胡少华. 4HF－1100 型花生复收机[J]. 粮油加工与食品机械，1984(7)：43－47.
HU Shaohua. 4HF－1100 peanut recovery machine[J]. Grain and Oil Processing and Food Machinery，1984(7)：43－47.（in Chinese）

[10] 王青华，丁付杰，朱桦，等. 一种落果复收机构及花生联合收获机. CN106818020A[P]. 2017－06－13.

[11] 杨然兵，范玉滨，尚书旗，等. 4HBL－2 型花生联合收获机复收装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2016，47(9)：115－120，107.
YANG Ranbing，FAN Yubin，SHANG Shuqi，et al. Design and experiment of twice-receiving device on 4HBL－2 peanut combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(9)：115－120，107.（in Chinese）

[12] 常增村，王东伟，何晓宁，等. 滚筒筛式花生荚果复收机的设计与试验研究[J]. 农机化研究，2023，45(2)：86－91.
CHANG Zengcun，WANG Dongwei，HE Xiaoning，et al. Design and experimental study of drum screen type peanut pod restorer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2023，45(2)：86－91.（in Chinese）

[13] 王伯凯，于昭洋，胡志超，等. 花生捡拾收获机三风系风选系统流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(11)：103－114.
WANG Bokai，YU Zhaoyang，HU Zhichao，et al. Numerical simulation and experiment of flow field in three air systems of air separation system of peanut pickup harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(11)：103－114.（in Chinese）

[14] 吕严柳. 油莎豆收获机挖掘升运装置设计与试验[D]. 郑州：河南农业大学，2022.
LÜ Yanliu. Design and experiment of excavating and hoisting device of *Cyperus esculentus* harvester[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[15] 许涛，沈永哲，高连兴，等. 基于两段收获的弹齿式花生捡拾机构研究[J]. 农业机械学报，2016，47(3)：90－97,111.
XU Tao, SHEN Yongzhe, GAO Lianxing, et al. Spring-finger peanut pickup mechanism based on two-stage harvest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 90－97,111. (in Chinese)
[16] 吕金庆，田忠恩，杨颖，等. 4U2A 型双行马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报，2015，31(6)：17－24.
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. Design and experimental analysis of 4U2A type double-row potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 17－24. (in Chinese)
[17] 魏梦阳. 滚筒式马铃薯收获机关键部件的设计及仿真分析[D]. 武汉：湖北工业大学，2018.
WEI Mengyang. The design and simulation analysis of key components of the roller potato harvester[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018. (in Chinese)
[18] 顾炳龙，杨亚洲，张玉虎，等. 花生静摩擦系数刚度系数测量[J]. 农业与技术，2017，37(7)：30－32.
GU Binglong, YANG Yazhou, ZHANG Yuhu, et al. Measurement of static friction coefficient and stiffness coefficient of peanuts[J]. Agriculture and Technology, 2017, 37(7): 30－32. (in Chinese)
[19] 杨然兵，杨红光，尚书旗，等. 马铃薯联合收获机立式环形分离输送装置设计与试验[J]. 农业工程学报，2018，34(3)：10－18.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of vertical circular separating and conveying device for potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 10－18. (in Chinese)
[20] 杨望，张栩梓，杨坚，等. 木薯收获机土薯抖动分离装置性能仿真及试验[J]. 农业工程学报，2017，33(16)：18－25.
YANG Wang, ZHANG Xuzi, YANG Jian, et al. Simulation and test on performance of soil-cassava jitter separation device of cassava harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 18－25. (in Chinese)
[21] 谢胜仕，王春光，邓伟刚，等. 摆动分离筛薯土分离机理分析与参数优化试验[J]. 农业机械学报，2017，48(11)：156－164.
XIE Shengshi, WANG Chunguang, DENG Weigang, et al. Separating mechanism analysis and parameter optimization experiment of swing separation sieve for potato and soil mixture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 156－164. (in Chinese)
[22] 魏忠彩，李洪文，苏国梁，等. 缓冲筛式薯杂分离马铃薯收获机研制[J]. 农业工程学报，2019，35(8)：1－11.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SU Guoliang, et al. Development of potato harvester with buffer type potato-impurity separation sieve[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 1－11. (in Chinese)
[23] 付敏，李庆双，郝镒林，等. TRIZ 辅助马铃薯收获机薯土分离输送装置创新设计[J]. 中国农机化学报，2023，44(3)：6－12.
FU Min, LI Qingshuang, HAO Yilin, et al. TRIZ aided innovative design of potato soil separating and conveying device for potato harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(3): 6－12. (in Chinese)
[24] 魏忠彩，苏国梁，李学强，等. 基于离散元的马铃薯收获机波浪形筛面参数优化与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(10)：109－122.
WEI Zhongcai, SU Guoliang, LI Xueqiang, et al. Parameter optimization and test of potato harvester wavy sieve based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 109－122. (in Chinese)
[25] 王政增，吴秀丰，杨然兵，等. S 型链式马铃薯收获机挖掘装置的设计及有限元分析[J]. 农机化研究，2020，42(8)：142－146.
WANG Zhengzeng, WU Xiufeng, YANG Ranbing, et al. Design and finite element analysis of s-type chain potato harvester excavation device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(8): 142－146. (in Chinese)
[26] 李汉青，颜丙新，武广伟，等. 双轨道弹射式水稻精量直播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(2)：60－72.
LI Hanqing, YAN Bingxin, WU Guangwei, et al. Design and experiment of double-track ejection rice precision direct seeding metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 60－72. (in Chinese)
[27] 郝建军，魏文波，黄鹏程，等. 油葵籽粒离散元参数标定与试验验证[J]. 农业工程学报，2021，37(12)：36－44.
HAO Jianjun, WEI Wenbo, HUANG Pengcheng, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of oil sunflower seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12): 36－44. (in Chinese)
[28] 刘立晶，马超，刘忠军. 基于 EDEM 的带状深松全层施肥铲作业参数优化与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(10)：74－83.
LIU Lijing, MA Chao, LIU Zhongjun. EDEM-based parameter optimization and experiment of full-layer fertilization shovel for strip subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 74－83. (in Chinese)
[29] 丁力，豆宇飞，王万章，等. 组合孔内充式油莎豆排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(12)：100－115.
DING Li, DOU Yufei, WANG Wanzhang, et al. Design and experiment of seed metering device with combination hole and inner filling for *Cyperus esculentus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 100－115. (in Chinese)
[30] 武涛，吴合槟，刘庆庭，等. 基于 EDEM 的甘蔗田间运输车输送装置性能研究[J]. 中国农机化学报，2021，42(7)：107－114.
WU Tao, WU Hebin, LIU Qingting, et al. Study on the delivery device performance of sugarcane filed transporter based on EDEM[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(7): 107－114. (in Chinese)
[31] WANG S, HU Z, YAO L, et al. Simulation and parameter optimisation of pickup device for full-feed peanut combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106602.