

多级切流式花生捡拾收获机摘果输送装置设计与试验

徐弘博^{1,2} 张 鹏^{1,2} 张延化² 王申莹² 于昭洋² 顾峰玮²

(1. 山东省主要农作物机械化生产装备协同创新中心, 青岛 266109; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 全喂入切流式花生摘果作业方式作为花生机械化收获的主要手段, 存在有效摘果时间短、损失率高的问题。为此设计一种多级切流式花生捡拾收获机摘果输送装置, 主要由多级滚筒、前输送板、驱振轴和后输送板等组成, 将传统花生捡拾收获机的摘果装置与输送装置一体化, 采用7级滚筒串联与振动输送组合的结构形式实现摘果与输送协同作业。本文在对关键部件作业原理分析的基础上进行结构和参数设计; 采用离散元软件 EDEM 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; 以花生主产区典型品种“大白沙”作为研究对象, 通过田间试验对摘果输送装置的作业性能进行试验验证。结果表明, 当花生植株喂入量 5.6 kg/s、二级滚筒转速 325 r/min、其他滚筒转速 239 r/min、输送板方向角 25°、振幅 45 mm、频率 7 Hz 时, 花生摘净率 98.41%, 破损率 4.76%, 夹带损失率 1.46%。各项性能均满足设计要求。

关键词: 花生捡拾收获机; 多级切流式; 摘果输送装置; EDEM; 田间试验

中图分类号: S225.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0052-09

Design and Experiment of Peanut Pod-picking and Conveying Device of Multistage Tangential Flow Type Peanut Combine

XU Hongbo^{1,2} ZHANG Peng^{1,2} ZHANG Yanhua² WANG Shenying² YU Zhaoyang² GU Fengwei²

(1. Collaborative Innovation Center for Shandong's Main Crop Production Equipment and Mechanization, Qingdao 266109, China
2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: The full-feed tangential flow type peanut picking operation as the main way of peanut mechanization harvest has problems on short effective time and high loss rate of pod-picking. In order to solve this problem, a multistage tangential flow peanut picker and conveying device was developed which mainly composed of multistage pod-picking cylinder, front conveying plate, vibration drive shaft and rear conveying plate. The conveying device and the pod-picking device of traditional peanut combine harvester were integrated. The mechanism of seven-stage roller in series combined with vibration conveying was proposed to realize synchronous operation of pod-picking and conveying. The structure and parameters of the key components were designed on the basis of the operating principle analysis. The simulation and optimization method of discrete element software EDEM was used to analyze the motion parameters (direction angle, amplitude, frequency) of the conveying board. Taking the typical peanut variety “Dabaisha” in the main producing area as the research object, the simulation results were verified by field experiments in Zhumadian City, Henan Province. The results showed that when the feeding amount of peanut plants, the rotation speed of the second pod-picking cylinder, the rotation speed of the other six pod-picking cylinders, the direction angle of the conveying plate, the amplitude and the frequency were set to be 5.6 kg/s, 325 r/min, 239 r/min, 25°, 45 mm and 7 Hz respectively, the picking rate, breakage rate and enrolling loss rate of peanut were 98.41%, 4.76% and 1.46%, respectively. The research results were helpful for the development and promotion of mechanized peanut harvesting technology.

Key words: peanut combine; multistage tangential flow; pod-picking and conveying device; EDEM; field experiment

收稿日期: 2023-05-30 修回日期: 2023-09-01

基金项目: 山东省主要农作物机械化生产装备协同创新中心开放基金项目(SDXTZX-09)、江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2021-22)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-13)

作者简介: 徐弘博(1989—),男,助理研究员,博士,主要从事果类作物机械化收获装备研究,E-mail: xuhongbo@caas.cn

通信作者: 张鹏(1984—),男,副研究员,博士,主要从事农业机械化技术与装备研究,E-mail: zhangpeng01@caas.cn

0 引言

花生两段式收获,即先挖掘晾晒再捡拾摘果,是花生机械化收获的典型模式之一^[1-2]。花生捡拾收获机能够一次性完成挖掘后花生的荚果与秧蔓收集,是实现花生两段式收获的关键技术装备。据FAO最新统计,中国花生年产量占世界产量的37.9%,位居世界第一^[3]。随着我国种植产业结构的调整,花生种植面积仍将持续增长以及规模化生产发展日益凸显,实现花生机械化高效收获显得尤为重要^[4-5]。近年来,中国花生捡拾收获技术发展迅速,在河南等花生主产区获得广泛应用,并逐步替代场地摘果机成为主流收获机具,极大提高了生产效率^[6-9]。然而,现有花生捡拾收获机依然存在损失率、破损率偏高等问题,作业质量仍需进一步优化^[10-11]。

摘果装置能够实现花生果、秧分离,是花生捡拾收获机的核心工作部件之一^[12-13]。摘果装置按照结构形式可分为轴流式、切流式、轴切混合式等。陈中玉等^[14]设计了一种螺杆弯齿式轴流全喂入花生摘果装置,对关键部件(螺杆、弯齿和凹板筛等)进行了设计计算与试验优化。于欣东等^[15]研制了一种切流式双滚筒花生摘果装置,并通过试验确定了最优参数组合。关萌等^[16]设计出一种多功能组合式全喂入花生摘果试验装置,通过改变和控制花生植株运动方向,可实现切流单滚筒、轴流单滚筒、切轴流双滚筒等7种不同摘果方案。轴流式摘果装置结构简单,摘净率高,目前应用较为广泛,但轴流滚筒的喂入量适应性较差,由于植株繁茂,喂入口容易拥堵;切流式摘果装置作业效率高,对物料含水率适应性强,但摘果时间短,未摘净和夹带损失偏高^[17]。

随着产业发展和生产技术的进步,中国花生总产和单产也不断提高,对花生的收获作业效率也提出更高的要求。为此,本文研制一种多级切流式花生捡拾收获机摘果输送装置,在有限空间内适配7级滚筒串联与振动输送机构,将传统花生捡拾收获机的输送装置与摘果装置一体化,实现摘果输送协同作业。对关键部件进行设计及仿真优化并完成作业性能试验验证,保持高效作业的同时提高摘净率。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构及传动系统

本文研究的摘果输送装置以农业农村部南京农业机械化研究所研制的4HZJ-3000型花生捡拾收获机(配套动力92 kW)为载体,收获行数:8行,喂

入量:5~7 kg/s。摘果输送装置如图1所示,主要由机架、摘果(输送)滚筒、动力输入带轮、前输送板、驱振轴、后输送板、凹板筛等组成。机架前端与捡拾装置连接,后端与集/排秧装置连接,各级滚筒与机架通过机架两侧的轴承座连接,前输送板与后输送板通过摆杆与机架连接,摆杆与驱振轴通过连杆连接。摘果输送装置主要结构参数如表1所示。

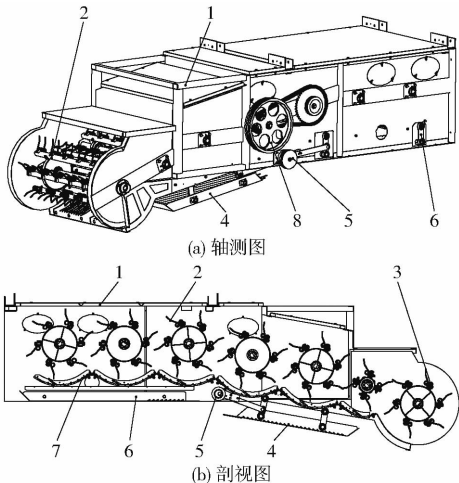


图1 摘果输送装置结构图

Fig.1 Structure composition diagram of pod-picking and conveying device

1. 机架 2. 摘果滚筒(6个) 3. 输送滚筒(1个) 4. 前输送板
5. 驱振轴 6. 后输送板 7. 凹板筛(6个) 8. 动力输入带轮

表1 摘果输送装置主要结构参数

Tab.1 Main structure parameters of pod-picking and conveying device

参数	数值
摘果输送装置尺寸(长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	4 367×1 676×1 498
摘果输送装置质量/kg	1 500
摘果滚筒宽度/mm	1 130
摘果滚筒数量/个	6
输送滚筒数量/个	1
凹板筛数量/个	6
前输送板角度/(°)	10
后输送板角度/(°)	0

摘果输送装置传动路线如图2所示,发动机的动力到达输入带轮并驱动四级滚筒,四级滚筒通过链传动驱动五级滚筒,五级滚筒的主轴一端设有带轮并通过带传动驱动驱振轴,驱振轴驱动前、后输送板抖动;四级滚筒和五级滚筒又分别通过链传动的形式依次驱动其他滚筒转动。

1.2 作业原理

图3为多级切流式花生捡拾收获机的作业原理图。作业时,捡拾装置拾起的花生植株首先进入一级滚筒,一级滚筒下方没有凹板筛,只实现花生植株

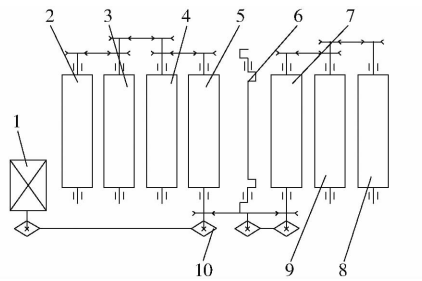


图2 传动系统示意图
Fig.2 Schematic of transmission system

1. 发动机 2. 一级滚筒 3. 二级滚筒 4. 三级滚筒 5. 四级滚筒 6. 驱振轴 7. 五级滚筒 8. 七级滚筒 9. 六级滚筒 10. 动力输入带轮

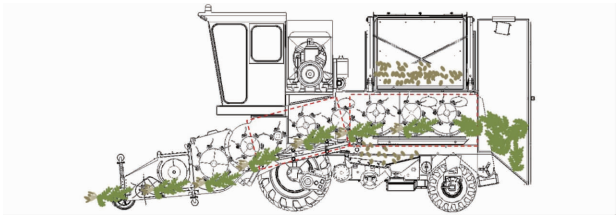


图3 多级切流式花生捡拾收获机作业原理图
Fig.3 Operation schematic of multistage tangential flow type peanut combine

的抓取与向后上方输送;当花生植株进入二级滚筒到四级滚筒时,由于滚筒与凹板筛的作用开始进行花生摘果和向后上方输送,摘脱的花生荚果穿过凹板筛落到前输送板上,前输送板通过机械振动形式将花生荚果向后上方输送;当花生植株进入五级到七级摘果滚筒时,前几个滚筒还未摘净的花生植株继续摘果,摘脱的花生荚果穿过凹板筛落到后输送板上,后输送板通过机械振动形式将花生向前输送;前、后输送板将花生荚果送入清选装置进行果、杂分离,剩余的花生秧蔓被七级滚筒甩出落入集/排秧装置中。

该装置实现花生摘果输送一体化设计,免除了传统花生捡拾收获机在捡拾装置和摘果装置之间需要布置的输送部件,捡拾装置直接与摘果输送装置连接,在不增加机具总长的条件下增长了摘果距离,满足大喂入量、高含水率条件下的摘净要求。

2 摘果部件设计

2.1 摘果滚筒

2.1.1 摘果滚筒直径

大量实践表明,摘果滚筒直径越小,越容易使花生秧蔓缠绕甚至堵塞机具,文献[17]中分析认为花生切流式摘果滚筒直径不宜小于350 mm(齿外端),参考谷物脱粒滚筒的标准直径,尺寸多在400~800 mm之间^[18];直径大的脱粒滚筒能够提高果秧

分离能力和生产率,减少秧蔓粉碎程度,降低总功耗^[18],因此在机具尺寸合理的前提下应尽量选择直径较大的摘果滚筒。本文研制的摘果部件中,考虑到机具总体尺寸及各部件之间的适配及位置关系,配置7级滚筒(包括一级输送滚筒及二至六级摘果滚筒),其中二级滚筒直径为500 mm(齿外端),其他6个滚筒直径为680 mm(齿外端)。

2.1.2 摘果滚筒转速

文献[19]研究发现提高摘果滚筒转速能提高摘净率,但会增加破损率。文献[16]中通过试验分析出切流摘果线速度取8~10 m/s时,摘果性能最优。则滚筒转速

$$n = \frac{60v_1}{\pi D} \times 1\,000 \tag{1}$$

式中 n ——滚筒转速,r/min
 v_1 ——滚筒线速度,本设计中保存摘果时线速度一致,取8.5 m/s
 D ——滚筒直径

其中二级摘果滚筒直径为500 mm,其他摘果滚筒直径为680 mm。

通过式(1)可以计算出,第二摘果滚筒转速为325 r/min,其他6个摘果滚筒转速为239 r/min。

2.2 摘果元件

切流式摘果滚筒的摘果元件可选用钉齿式、弓齿式、纹杆式、弹齿式等。本研究采用多级切流式花生摘果作业模式,由于增加了果秧与摘果部件的有效接触时长,且相比其它摘果方式,弹齿式摘果元件可降低破损率,适于花生等易于破碎的作物^[20],因此本设计选用弹齿式摘果元件。

2.2.1 摘果弹齿排数

为了平衡,摘果弹齿排数一般选用偶数,常见排数为4、6、8排,随滚筒直径而异。排数过小,顺畅性降低;排数过大,抓取能力减弱^[16]。弹齿排数为

$$H = \frac{\pi D}{S} \tag{2}$$

式中 H ——弹齿排数
 S ——弹齿排间距,mm

一般取喂入的植株长度,花生喂入植株高度取380 mm。则可以计算出,二级摘果滚筒排数为4.1(取4排),其他6个摘果滚筒排数为5.6(取6排)。

2.2.2 摘果弹齿抓取范围与倾角

如图4所示,摘果弹齿齿尖圆到齿底圆的距离 L 为抓取范围。摘果间隙过小会导致花生植株压的太紧太实,增加破损率,降低摘净率;摘果间隙过大会减少花生荚果与凹板筛的接触,也降低摘净率,因此摘果间隙的设计一般与晾晒后花生植株的平躺高

度相匹配。根据实地测量,主产区常见品种花生植株晾晒后的平躺高度普遍在 80 ~ 120 mm 之间,因此本设计取抓取范围 $L = 100$ mm。

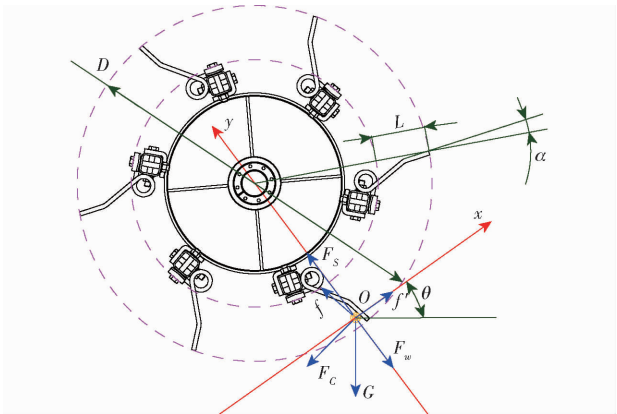


图 4 摘果弹齿结构与作用力分析

Fig. 4 Structure and force analysis of spring teeth for pod-picking

如图 4 所示,摘果弹齿末端弹簧丝轴线与其至摘果滚筒中心连线夹角 α 为弹齿倾角(后倾取正值,前倾取负值),该倾斜直接影响摘果弹齿的抓取与分离能力。当位置角 θ 为 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 时,花生植株位于抓取相位,此时花生植株在 x 轴的受力为

$$\sum F_x = f' - F_c \cos \alpha - f \sin \alpha - G \sin(-\theta) \quad (3)$$

其中

$$f = \mu F_c$$

式中 f' ——凹板筛对花生植株的阻力, N

F_c ——弹齿对花生植株的支持力, N

f ——凹板筛对花生植株的支持力, N

G ——花生植株重力, N

μ ——弹齿的摩擦因数

由式(3)可知,弹齿倾角 α 越大,花生植株在 x 轴所受合力 $\sum F_x$ 越小,从而弹齿对花生植株的携带能力越弱,越不利于花生植株的抓取。

当位置角 θ 为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时,花生植株位于脱离相位,此时花生植株在 y 轴的受力为

$$\sum F_y = -F_w - G \cos \theta - F_c \sin \alpha + f \cos \alpha + F_s \quad (4)$$

式中 F_w ——花生植株的离心力, N

F_s ——凹板筛对花生植株的支持力, N

由式(4)可知,弹齿倾角 α 越大,花生植株在 y 轴所受合力 $\sum F_y$ 越小,从而弹齿对花生植株的携带能力越强,越有利于花生植株的分离。

由上述分析可知摘果弹齿的抓取能力与分离能力是相互矛盾的,参考现有设计经验^[17,19-21],摘果弹齿一般选取后倾角 $0^\circ \sim 20^\circ$,结合前期多轮试验经验,本设计取弹齿倾角 $\alpha = 10^\circ$ 。

2.3 凹板筛

2.3.1 凹板筛结构

凹板筛和滚筒共同组成摘果部件,凹板筛结构如图 5 所示,包括侧板、安装板、筛网和钉齿。其中筛网由圆钢交织构成,横向圆钢在内侧,可以对花生荚果起到刷脱作用,刷脱的花生荚果在重力作用下透过筛网,而花生秧蔓在滚筒带动下继续沿凹板筛运动,实现果秧分离。筛网的尺寸必须大于荚果尺寸,但过大的筛网尺寸降低摘果能力,参考已有设计与试验结果^[19],筛网尺寸选择 80 mm × 80 mm。

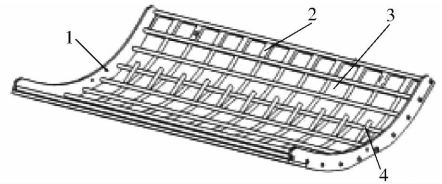


图 5 凹板筛结构图

Fig. 5 Structure diagram of concave screen

1. 侧板 2. 安装板 3. 筛网 4. 钉齿

钉齿能够显著增强摘果能力,但同时也会增加荚果的破损率,常见带钉齿的收获作业机具的钉齿排数为 4 ~ 6 排^[18]。花生秧蔓含水率偏高,摘果难度大,因此在每个凹板筛上设有 1 排钉齿,共 6 排。钉齿呈后倾 30° 焊接在筛网上,且顶端平面和摘果弹齿末端平面留有 20 mm 间隙,可起到降低破损率的作用。

2.3.2 摘果间隙与包角

摘果弹齿末端与凹板筛表面的间隙定义为摘果间隙。摘果间隙对花生摘果工作影响较大,间隙小可提高摘净率,但破损率增加;间隙大时,却易产生摘果不净,增加摘果损失^[16]。因此,需要找到可行的摘果间隙,能够兼顾摘净率、破损率及生产率。通过调查可知主产区常见花生荚果高度小于 50 mm,因此摘果间隙均设置为 50 mm。

凹板筛包角是指凹板筛圆弧所对应的圆心角,包角越大,摘果次数也增加,但增大包角必须同时增大相邻滚筒的中心距,从而减低交接顺畅性,容易使秧蔓缠绕滚筒。前期研究表明相邻滚筒重叠量为 50 mm 时可保证顺畅交接,按照此重叠量与摘果间隙,通过余弦定理可以确定凹板筛的包角为

$$\beta < \arccos \left(1 - \frac{(D-z)^2}{2 \left(\frac{D}{2} + s \right)} \right) \quad (5)$$

式中 z ——滚筒重叠量,取 50 mm

s ——摘果间隙,取 50 mm

计算出 $\beta < 108^\circ$ 。由于安装位置的限制以及各滚筒尺寸和位置关系,本设计中的 6 个凹板筛包角小于

理论计算值,依次为 58°、86°、93°、83°、93°和 80°,符合常规凹板筛包角的推荐范围^[18]。其中特意缩小最后一个凹板筛的包角(80°),可增加秧蔓排出的顺畅性。

3 输送部件设计

3.1 结构与工作原理

图 6 所示的输送部件主要由前输送板、驱振轴和后输送板组成,其中驱振轴上设有 2 对偏心套,分别与前输送板连杆和后输送板连杆组成曲柄连杆机构,在驱振轴的转动下带动前输送板摇臂和后输送板摇臂往复运动。前、后输送板上均设有台阶面,对花生荚果在振动输送过程中起到支撑作用。振动输送筛不仅能分筛土杂,而且可以把筛面上的荚果输送。花生荚果经过摘果部件的摘果作业透过凹板筛掉落在输送板上时,前输送板将花生荚果向后上方输送,后输送板将花生荚果向前方输送,使得所有摘下的花生荚果和少量断枝断秧进入清选装置。本设计采用双筛式摆动筛可平衡惯性力,将曲轴放在两筛之间且两个筛子与曲轴的连接相错 180°,因此惯性力可能全部或大部分得到平衡。

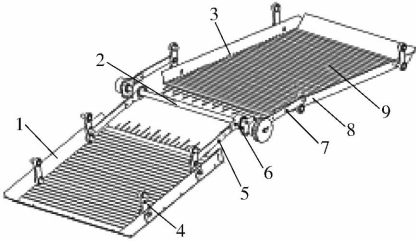


图 6 输送部件结构图

Fig.6 Structure diagram of conveyor part

1. 前输送板 2. 驱振轴 3. 后输送板 4. 前输送板摇臂 5. 前输送板连杆 6. 偏心套 7. 后输送板连杆 8. 后输送板摇臂 9. 台阶面

对输送板的工作原理进行分析,由于前、后输送板的工作原理相同,因此本文只分析前输送板的工作原理。如图 7 所示,偏心套、连杆与摇臂共同构成曲柄连杆机构,前输送板安装在摇臂的延长线上,前输送板上各点按一定的摆动方向做近似直线的往复运动,摆动方向与前输送板之间的夹角 φ 为方向角,输送板上任意一点的最大位移 Z 为振幅,偏心套的转动周期 F 为频率,这些参数共同影响前输送板的输送性能。工作时,物料在筛面上被抛起、破碎和筛落,剩余部分则沿着筛面向下移动。为了使物料从筛面上抛起,输送板加速度的法向分量 a_1 应满足关系式

$$a_1 = \omega^2 r \sin(\omega t) \geq g \cos \alpha \tag{6}$$

式中 r ——偏心轮的偏心半径, m

ω ——偏心轮角速度, rad/s
 t ——时间, s

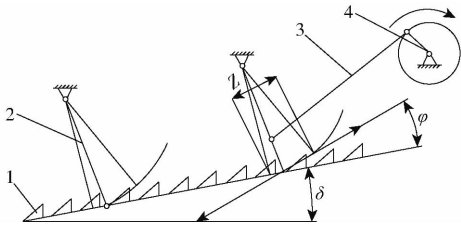


图 7 输送板工作原理图

Fig.7 Working principle diagram of conveyor board

1. 前输送板 2. 摇臂 3. 连杆 4. 偏心套

3.2 输送板离散元仿真

输送板的运动参数对花生物料的输送性能具有直接影响,为快速准确确定输送板运动参数的选取范围,本研究利用 EDEM 离散元分析软件^[21-22]对输送板的工作过程进行模拟仿真。本文仅对前输送板进行模拟仿真并分析运动参数,由于前、后输送板共用一个驱振轴,为保持平衡,后输送板的运动参数与前输送板保持一致。

3.2.1 模型建立

输送板的实际结构较为复杂,为节约计算时间,将不影响仿真结果的零部件忽略,得到输送板几何模型(图 8a)。输送板与水平面夹角为 10°,模型在坐标空间中的范围为 800 mm × 600 mm × 100 mm。

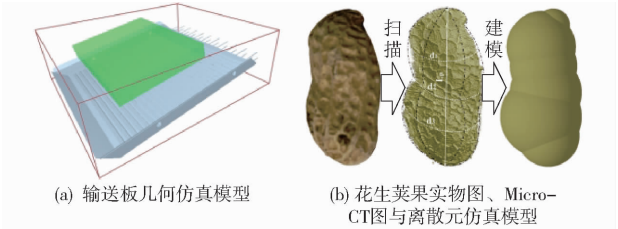


图 8 仿真建模

Fig.8 Simulation modeling

在输送板上依据凹板筛位置和尺寸设置颗粒工厂,根据实际作业喂入量,并假设全部花生荚果都在此位置被摘下。由于花生摘果与输送的效率是影响花生捡拾喂入的直接因素,在不发生堵塞的前提下,花生秧果的最大喂入量为 5.6 kg/s,花生荚果占花生秧果比例约为 50%,因此,取物料生成速率为 2.73 g/s。选取花生主产区典型花生品种“大白沙”作为研究对象,利用 Micro-CT(MX,苏州海斯菲德信息科技有限公司)对花生外观形貌进行扫描,得到花生外形的三维几何尺寸,取各尺寸的平均值分别为上端直径 $d_1 = 14.36 \text{ mm}$,中端直径 $d_2 = 14.58 \text{ mm}$,下端直径 $d_3 = 17.09 \text{ mm}$,长度 $L_p = 34.22 \text{ mm}$ 。在花生外观尺寸参数基础上建立花生荚果离散元仿真模型(图 8b)。由于花生荚果尺寸不规则,因此尺寸分布设置为 0.8 ~ 1.2 随机分布。

3.2.2 参数设置

花生输送过程中,花生物料之间或与输送板之间无粘附等作用力,因此接触模型采用 Hertz - Mindlin (no slip) 接触模型^[23-24]。花生与输送装置相关材料与接触力学参数如表 2 所示^[25-27]。

表 2 仿真材料与力学参数

Tab.2 Simulation materials and mechanical properties

项目	参数	数值
花生	剪切模量/Pa	2.0×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	450
	泊松比	0.35
钢板	剪切模量/Pa	7.9×10^{10}
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 865
	泊松比	0.3
花生-花生	恢复系数	0.35
	静摩擦因数	0.5
	滚动摩擦因数	0.05
花生-钢板	恢复系数	0.42
	静摩擦因数	0.45
	滚动摩擦因数	0.03

3.2.3 单因素试验

输送板的运动参数包括方向角、振幅和频率,对各运动参数进行单因素试验,方向角 φ 取 5° 、 15° 、 25° 、 35° 、 45° ;振幅 Z 取 15、30、45、60、75 mm;频率 F 取 3、5、7、9、11 Hz。花生物料从 0 s 开始生成,5 s 结束生产,仿真时长为 8 s。

图 9 为输送板上方的花生荚果总质量随时间的变化曲线。由图 9a 可以看出,频率 7 Hz, 振幅 45 mm 时,随着方向角的增大,输送板上方的花生总质量先减小后增大,方向角为 25° 时,输送板上花生总质量最小,说明此时花生输送最为顺畅(图 10a)。由图 9b 可以看出,方向角 25° 、振幅 45 mm 时,随着频率的增大,输送板上方的花生总质量不断减小,说明花生输送顺畅性随频率的增高而增高,而频率为 3 Hz 时无法正常输送,花生荚果在输送板上发生拥堵(图 10b)。由图 9c 可以看出,方向角 25° 、频率 7 Hz 时,随着振幅的增大,输送板上方的花生总质量不断减小,说明花生输送顺畅性随振幅的增高而增高,而振幅为 15 mm 时无法正常输送。

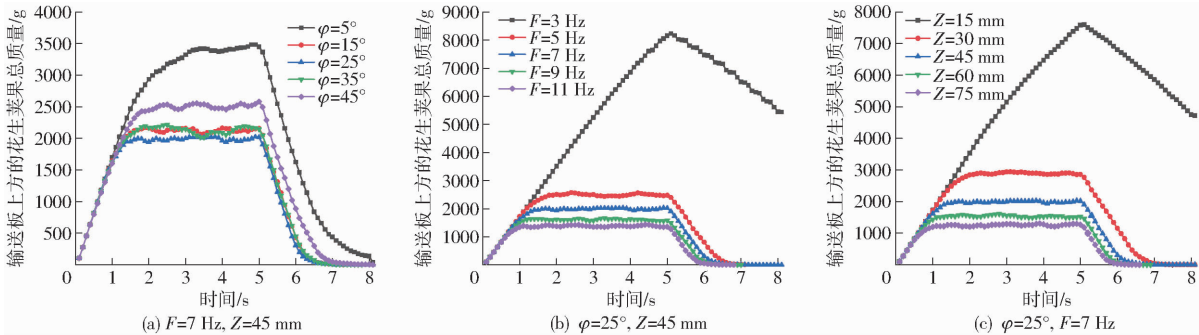


图 9 花生荚果总质量随时间变化曲线

Fig.9 Variation curves of total mass of peanut pods with time

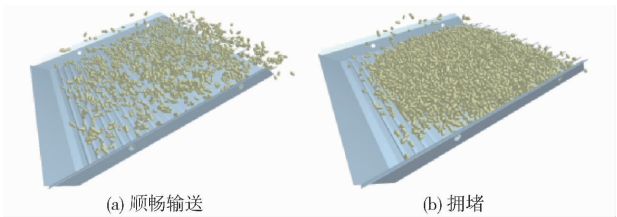


图 10 花生荚果输送状态

Fig.10 Conveying state of peanut pods

由上述分析可以发现,方向角为 25° 最有利于花生顺畅输送,且频率和振幅的提高有助于花生输送。但振幅和频率的改变可能会导致装置功耗和花生破损率的变化,根据动量守恒定律,通过花生物料的总动能来反映装置功耗与花生破损率的变化规律。

图 11 为输送板上方的花生荚果总动能随时间的变化曲线。由图 11a 可以看出,频率越低,花生物料获得的动能越低,装置功耗与花生破损率越低;由

图 11b 可以看出,振幅越小,花生物料获得的动能越小,装置功耗与花生破损率越低。因此应在顺畅输送的前提下,选取尽可能小的振幅与频率。综合考虑,在已完成的单因素试验中,选取方向角 $\varphi = 25^\circ$, 振幅 $Z = 45 \text{ mm}$, 频率 $F = 7 \text{ Hz}$, 此时花生物料可以顺畅输送,且花生物料的总动能保持相对较低水平。

4 性能试验

4.1 试验条件与材料

为验证摘果输送装置的作业性能,于 2020 年 9 月在我国花生主产区河南省汝南县试验基地 ($32^\circ48'N$, $114^\circ24'E$) 进行试验。试验期间大气平均温度和相对湿度分别为 28.7°C 和 42.2% 。试验机为 4HZJ-3000 型花生捡拾收获机,摘果输送装置结构按照表 1 设计参数试制。花生捡拾收获机试验作业参数与设计、仿真参数一致,具体参数值如表 3 所示。

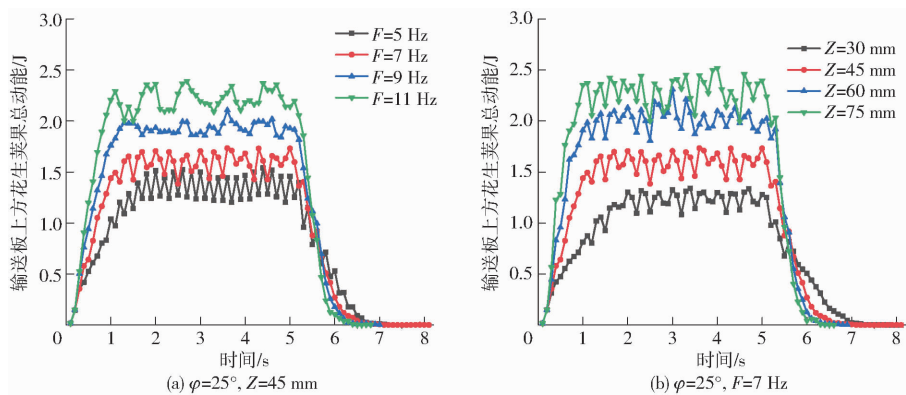


图 11 花生荚果总动能随时间变化曲线

Fig. 11 Variation curves of total kinetic energy of peanut pods with time

表 3 花生捡拾收获机试验作业主要参数

Tab. 3 Main parameters of field experiment of pod-picking and conveyor device

参数	数值
喂入量/(kg·s ⁻¹)	5.6
多级摘果滚筒转速/(r·min ⁻¹)	240
输送筛振幅/mm	45
输送筛频率/Hz	7
前输送板角度/(°)	25
后输送板角度/(°)	0



图 12 摘果输送装置田间试验

Fig. 12 Field experiment of pod-picking and conveying device

试验用花生品种采用“大白沙”,用花生挖掘机挖掘并晾晒 4 d 后通过 105℃ 烘干法^[28]测得花生秧蔓含水率为 14.28%,花生果含水率为 15.74%。带果秧蔓平均长度为 400 mm,试验田场地面积为 5 000 m² (100 m×50 m),土壤类型为沙壤土。

4.2 试验方法和评价指标

试验参照 NY/T 502—2016《花生收获机 作业质量》与 NY/T 993—2006《花生摘果机 作业质量》的相关规定执行,选取摘净率、破损率和夹带损失率作为评价摘果输送装置的性能指标。试验区划分为 5 个测试区,每个测试区域长度为 50 m,宽度为作业幅宽。试验过程中花生捡拾收获机保持匀速行驶,发动机转速达到额定转速,捡拾台保持一定高度恒定作业,用秒表记录每次试验时间。试验后用电子天平记录排出摘果输送装置的秧、果质量,计算每次试验的喂入量。试验重复 5 次,结果取平均值。试验情况如图 12 所示。

4.2.1 摘净率测定

收获机稳定作业 50 m,记录摘下来花生荚果的质量(果箱内)、花生秧蔓中夹带荚果的质量与未被摘下的荚果质量,摘净率为

$$\eta_p = \frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3} \times 100\%$$
 (7)

式中 η_p ——摘净率,%

m_1 ——摘下的荚果质量,g

m_2 ——未摘下的荚果质量,g

m_3 ——摘果后花生秧蔓中夹带的荚果质量,g

4.2.2 破损率测定

在果箱中随机选取 200 粒花生荚果,记录荚果的质量与其中破损花生荚果的质量,破损率为

$$\eta_b = \frac{m_4}{m_1} \times 100\%$$
 (8)

式中 η_b ——破损率,%

m_4 ——破损花生荚果质量,g

4.2.3 夹带损失率测定

收获机稳定作业 50 m,记录摘下来花生荚果的质量(果箱内)、花生秧蔓中夹带荚果的质量与未被摘下的荚果质量,夹带损失率为

$$\eta_e = \frac{m_3}{m_1 + m_2 + m_3} \times 100\%$$
 (9)

式中 η_e ——夹带损失率,%

4.3 试验结果与讨论

摘果输送装置的性能试验结果如表 4 所示。由表 4 可知,摘果输送装置的平均摘净率为 98.41%,破损率为 4.76%,夹带损失率为 1.46%,均满足设计要求。其摘果滚筒相互交接顺畅,花生物料没有明显卡滞、回带现象,能够保证作业效率和可靠性;摘果滚筒与凹板筛结构配置合理,实现了大喂入量条件下高效摘果和果秧分离;输送板作业过程中运

表 4 性能试验结果

Tab.4 Results of performance tests

试验序号	喂入量/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	摘净率/ %	破损率/ %	夹带损失 率/%
1	5.82	98.11	4.41	0.94
2	5.72	98.02	4.97	1.84
3	5.55	98.63	4.80	1.78
4	5.35	98.27	4.74	0.89
5	5.46	99.03	4.88	1.84
平均值	5.60	98.41	4.76	1.46
设计要求		≥ 95	≤ 5	≤ 2

行平稳,能够保证花生荚果高效顺畅输送。装置作业效果和整体性能达到设计预期。

与轴流式花生捡拾收获机^[7]的作业性能相比,多级切流式花生捡拾收获机通过增加摘果距离的方式,能够在大喂入量的条件下达到相似的作业效果,但破损率要稍高于轴流式摘果,这是由于多级切流式摘果对物料的打击次数较多,增加了荚果破损概率。可考虑采用柔性材料的摘果部件,亦可从农艺角度改良花生荚果的物理特性,从而降低破损率。

5 结论

(1)设计了一种多级切流式花生捡拾收获机摘果输送装置,在有限空间内将传统花生捡拾收获机的输送装置与摘果装置一体化,实现串联 7 个滚筒摘果输送协同作业,解决了传统切流式摘果部件存在的摘果时间短、未摘净和夹带损失偏高的问题。

(2)在分析摘果输送装置工作原理的基础上,对关键部件的结构和运动参数进行了设计。采用摘果滚筒与凹板筛组配结构,实现花生秧果分离与排秧;对花生物料进行受力分析,得出摘果弹齿倾角的设计依据;利用 EDEM 离散元分析软件模拟了输送板的工作过程,得到输送板最佳运动参数(方向角、振幅、频率)组合。

(3)通过田间试验对摘果输送装置的工作性能进行测试,结果显示作业的平均喂入量为 5.60 kg/s 时,摘果输送装置的平均摘净率为 98.41%,破损率为 4.76%,夹带损失率为 1.46%,各项作业性能均满足设计要求。

参 考 文 献

[1] 高连兴,陈中玉,CHEN Charles,等.美国花生收获机械化技术衍变历程及对中国的启示[J].农业工程学报,2017,33(12):1-9.
GAO Lianxing, CHEN Zhongyu, CHEN Charles, et al. Development course of peanut harvest mechanization technology of the United States and enlightenment to China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 1-9. (in Chinese)

[2] 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)

[3] FAO. Food and agriculture data[EB/OL]. [2023-05-20]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.

[4] 陈有庆,顾峰玮,吴峰,等.我国花生机械化收获科技创新概况与发展思考[J].江苏农业科学,2018,46(22):19-23.

[5] 吕小莲,王海鸥,张会娟,等.花生摘果技术及其设备的现状与分析[J].湖北农业科学,2012,51(18):4116-4118.
LÜ Xiaolian, WANG Haiou, ZHANG Huijuan, et al. Present situation and analysis on peanut picking technology and equipment[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(18): 4116-4118. (in Chinese)

[6] CAO M, HU Z, ZHANG P, et al. Key technology of full-feeding peanut picking by tangential flow method[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2019, 28(4): 66-74.

[7] 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)

[8] 郭鹏,尚书旗,王东伟,等.牵引式花生捡拾收获机的设计与试验[J].农机化研究,2021,43(12):92-97.
GUO Peng, SHANG Shuqi, WANG Dongwei, et al. Design and test of a trailed peanut picking and harvesting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(12): 92-97. (in Chinese)

[9] 尚书旗,李国莹,杨然兵,等.4HQL-2型全喂入花生联合收获机的研制[J].农业工程学报,2009,25(6):125-130.
SHANG Shuqi, LI Guoying, YANG Ranbing, et al. Development of 4HQL-2 type whole-feed peanut combine[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 125-130. (in Chinese)

[10] 关萌.全喂入花生摘果试验装置与摘果机关键部件研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.
GUAN Meng. Research on full-feeding penut picking test device and key components of peanut picker[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[11] 陈中玉,高连兴,CHEN C,等.中美花生收获机械化技术现状与发展分析[J].农业机械学报,2017,48(4):1-21.
CHEN Zhongyu, GAO Lianxing, CHEN C, et al. Analysis on technology status and development of peanut harvest mechanization of China and the United States[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 1-21. (in Chinese)

- [12] 王申莹, 胡志超, 徐弘博, 等. 全喂入式花生捡拾收获机捡拾输送装置研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 20–28.
WANG Shenying, HU Zhichao, XU Hongbo, et al. Design and test of pickup and conveyor device for full-feeding peanut pickup harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 20–28. (in Chinese)
- [13] 于昭洋, 胡志超, 曹明珠, 等. 切流式花生全喂入联合收获机清选机构设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 29–37.
YU Zhaoyang, HU Zhichao, CAO Mingzhu, et al. Design of cleaning device of tangential flow and whole-feed peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 29–37. (in Chinese)
- [14] 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.
CHEN 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)
- [15] 于欣东, 郭辉, 郭伟宏, 等. 基于两段收获的切流式双滚筒花生摘果装置研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(9): 83–87.
YU Xindong, GUO Hui, GUO Weihong, et al. Design and motion simulation of pneumatic device for picking up ground jujube[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(9): 83–87. (in Chinese)
- [16] 关萌, 陈中玉, 高连兴, 等. 多功能组合式全喂入花生摘果试验装置研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 88–94.
GUAN Meng, CHEN Zhongyu, GAO Lianxing, et al. Multifunctional modular full-feeding peanut picking testing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 88–94. (in Chinese)
- [17] 周德欢, 胡志超, 于昭洋, 等. 花生全喂入摘果装置的应用现状与发展思路[J]. 农机化研究, 2017, 39(2): 246–252.
ZHOU Dehuan, HU Zhichao, YU Zhaoyang, et al. Application situation and development route of the full-feeding peanut stripper[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2): 246–252. (in Chinese)
- [18] 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.
- [19] 周德欢. 花生联合收获全喂入摘果特性试验研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
ZHOU Dehuan. Experimental study on full-feeding picking characteristics of peanut combined harvesting[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. (in Chinese)
- [20] 李思漩, 尚书旗, 于艳, 等. 弹齿式花生摘果装置的设计与研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(2): 136–139.
LI Sixuan, SHANG Shuqi, YU Yan, et al. Researching design and experiments of research spring tined type picking peanut mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(2): 136–139. (in Chinese)
- [21] JAMES B, JACK D, MUSTAFA U, et al. Bentleg furrow opener performance analysis using the discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2020, 189: 99–115.
- [22] HANG Chengguang, HUANG Yuxiang, ZHU Ruixiang. Analysis of the movement behaviour of soil between subsoilers based on the discrete element method[J]. Journal of Terramechanics, 2017, 74: 35–43.
- [23] 刘彩玲, 黎艳妮, 宋建农, 等. 基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器的性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 32–39.
LIU Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 32–39. (in Chinese)
- [24] 戚江涛, 蒙贺伟, 坎杂, 等. 基于 EDEM 的双螺旋奶牛饲喂装置给料性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 65–71.
QI Jiangtao, MENG Hewei, KAN Za, et al. Analysis and test of feeding performance of dual-spiral cow feeding device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 65–71. (in Chinese)
- [25] 杨亚洲, 刘姗姗, 杨立权. 花生荚果及花生仁力学特性试验研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(10): 108–111.
YANG Yazhou, LIU Shanshan, YANG Liqun. Experimental study on mechanical properties of peanut pods and peanut kernels[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(10): 108–111. (in Chinese)
- [26] 陆永光, 胡志超, 林德志, 等. 基于 CFD–DEM 花生荚果管道输送过程数值模拟[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(6): 104–109.
LU Yongguang, HU Zhichao, LIN Dezhi, et al. Numerical simulation of peanuts particles conveying pipeline using CFD–DEM coupled approach[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6): 104–109. (in Chinese)
- [27] 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.
- [28] 颜建春, 魏海, 谢焕雄, 等. 筒状固定床花生通风干燥性能指标模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 292–302.
YAN Jianchun, WEI Hai, XIE Huanxiong, et al. Performance index simulation and analysis of peanut ventilation drying in barrel-shaped fixed bed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 292–302. (in Chinese)