

轴流式花生捡拾收获机设计与试验

王伯凯^{1,2} 胡志超^{1,2} 曹明珠^{1,2} 张鹏^{1,2} 于昭洋^{1,2} 张冲^{1,2}

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 农业农村部现代农业装备重点实验室, 南京 210014)

摘要: 针对花生全喂入捡拾收获过程捡拾率低、荚果损失率高、生产率低等问题, 基于花生生物学特点、荚-柄脱离特性及荚果破损机理, 设计了一种轴流式花生捡拾收获机。整机采用自走式底盘驱动, 配套动力 120 kW, 主要由捡拾装置、输送装置、摘果装置、清选装置、底盘系统、集果装置等组成, 可一次完成对田间条铺花生植株的捡拾、输送、果蔓脱离、果杂清选、提升集果等功能。在分析整机工作原理的基础上, 进行了关键部件结构设计及参数确定, 通过动量守恒原理和赫兹接触理论建立捡拾过程的碰撞模型和摘果装置关键参数方程, 并对荚果破损和荚-柄分离力学模型进行了定量分析, 确定以弹齿转速、摘果滚筒转速、机具前进速度为主要影响因素, 并针对“开农 61”品种花生进行试验研究。结果表明, 最优参数组合为弹齿转速 68 r/min、摘果滚筒转速 447 r/min、机具前进速度 1.4 m/s, 对应的捡拾率为 98.62%、荚果损失率为 2.11%、生产率为 0.61 hm²/h, 捡拾率、生产率比优化前分别提高了 2.1、4.5 个百分点, 荚果损失率比优化前降低了 0.9 个百分点, 综合性能明显提高。

关键词: 花生收获机; 轴流式; 捡拾装置; 摘果装置

中图分类号: S225.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)01-0109-10

OSID:



Design and Test of Axial-flow Peanut Picking and Harvesting Machine

WANG Bokai^{1,2} HU Zhichao^{1,2} CAO Mingzhu^{1,2} ZHANG Peng^{1,2} YU Zhaoyang^{1,2} ZHANG Chong^{1,2}

(1. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: Aiming at the problems of low picking-up rate, high pods loss rate and low productivity in the process of picking and harvesting peanuts with full feeding, an axial-flow peanut picking-up combine harvester was designed. The whole machine was driven by self-propelled chassis with supporting power of 120 kW. The picking speed, conveying speed, pods picking speed, cleaning frequency, cleaning fan speed and bucket lifting speed were controlled by chain and belt combined transmission. The machine was mainly composed of picking device, conveying device, pods picking device, cleaning device, chassis system, pods collecting device, etc. It could complete the tests of picking, conveying, pods vine separation, pods impurity cleaning, and pods collection in one time, which can reduce labor and cost. On the basis of analyzing the working principle of the whole machine, the structural design and parameter determination of the key parts were carried out. The collision energy model of separation process and the mechanical model of pod-handle separation were established by the principle of energy conservation. Based on this equation, quantitative analysis was carried out, and the main influencing factors were the elastic teeth speed, machine forward speed; and picked speed. The results showed that the significant order of picking-up rate was elastic teeth speed, machine forward speed and picked speed; the significant order of pods loss rate was elastic teeth speed, picked speed and machine forward speed; the significant order of productivity influence was machine forward speed, elastic teeth speed and picked speed; the optimal combination was 68 r/min for elastic teeth, 447 r/min for pods picking drum and 1.4 m/s for machine forward speed. The corresponding picking-up rate was 98.62%, the pods loss rate was 2.11% and the productivity was 0.61 hm²/h. The picking-up rate and productivity were 2.1 and 4.5 percentage

收稿日期: 2020-08-04 修回日期: 2020-10-01

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(S201936-38)、国家重点研发计划项目(2016YFD0702102)和国家现代农业花生产业技术体系项目(CARS-13)

作者简介: 王伯凯(1987—),男,助理研究员,主要从事农业机械化及其自动化研究,E-mail: wangbokai219@163.com

通信作者: 胡志超(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农作物收获及产后加工技术装备研究,E-mail: zchu369@163.com

points higher than that before, and the pods loss rate was 0.9 percentage points lower than before. Comprehensive performance was obviously improved. It was worth noting that this test was based on the picking-up mechanism of axial peanut full feeding harvester, and the test object was only “Kainong 61”. It was suggested that the performance of different peanut varieties and harvesting equipment with different structures should be discussed in depth.

Key words: peanut harvester; axial-flow type; picking-up device; pickup device

0 引言

花生是我国重要的油料作物和经济作物。目前,我国花生主产区收获仍以小型挖掘机为主,耗时、耗力,效率低、成本高,严重制约了花生产业的发展^[1-6]。花生捡拾收获机可对摊铺的花生秧蔓进行高效便捷的捡拾收获。由于花生品种及晾晒后秧蔓含水率不同,导致捡拾率低、荚果损失率高(包括捡拾荚果掉落和捡拾、摘果过程中的荚果破损)、生产率低下,这已经成为我国花生生产亟待解决的难题。

针对花生捡拾收获技术,国内外专家进行了很多理论和试验研究。国外有 KMC、AMADAS 的铲链组合式和 PEARMAN 公司的铲夹组合式系列花生捡拾收获机,这几种机型技术先进、成熟度高,但其生产模式和花生品种与国内存在差异,并且价格昂贵,难以适应中国花生生产的实际需求^[7]。陈中玉等^[8]进行了弹齿式花生捡拾收获机关键结构研究,在花生捡拾、摘果损伤理论和技术上取得了突破;王东伟等^[9]研制了背负式花生捡拾摘果收获机,该机可一次完成花生捡拾、输送、摘果、清选、集果等作业,性能良好;胡志超团队^[10]研制了多款花生捡拾收获机,并对关键工作部件进行深入研究,在捡拾机理、低损摘果、清选等方面取得了突破。轴流式花生捡拾收获机能减轻整机重量、降低成本,但目前对其整机结构组配、参数优化和对收获质量的影响研究较少。

本文以自行研制的轴流式全喂入花生捡拾收获机为基础,针对影响捡拾收获质量的瓶颈问题,结合花生摊铺晾晒农艺特点,确定关键部件结构参数和试验参数,进行收获质量试验研究,为明晰关键部件的工作机理、优化其结构参数及试验参数、提高综合质量提供理论基础和数据支撑。

1 总体结构与工作原理

花生捡拾联合收获工艺与技术路线如图 1 所示。轴流式花生捡拾收获机主要参数如表 1 所示,整机结构如图 2 所示,主要由捡拾装置、输送装置、摘果装置、清选装置、底盘系统、提升装置、集果箱等组成,可一次完成挖掘后田间条铺花生植株的捡拾

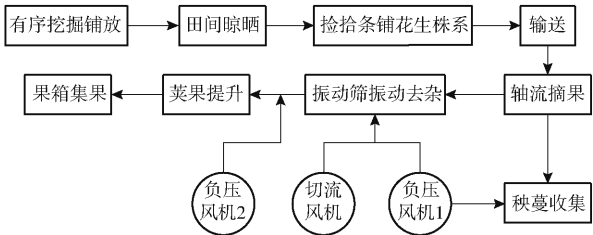


图 1 全喂入收获捡拾技术路线图

Fig.1 Road map of pickup operation of full feed harvesting technology

输送、果蔓脱离、果杂清选、提升集果等工序。

表 1 总体结构参数和关键部件工作参数

Tab.1 Structural and working parameters of test-bed

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 320×2 100×3 850
配套动力/kW	120
捡拾机构直径/mm	900
捡拾机构长度/mm	2 500
摘果滚筒长度/mm	1 100
振动筛倾角/(°)	30~45(可调)
提升量/(kg·s ⁻¹)	2.5

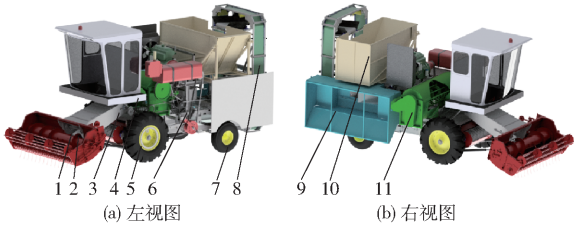


图 2 轴流式花生捡拾收获机轴测图

Fig.2 Axonometric drawings of axial-flow peanut picking and harvesting machine

1. 捡拾装置 2. 螺旋输送器 3. 链耙式输送器 4. 驾驶室 5. 驱动轮 6. 清选装置 7. 转向轮 8. 提升装置 9. 集秧箱 10. 集果箱 11. 摘果装置

收获机工作时,捡拾装置随行走系统以一定速度前进,随着捡拾滚筒上弹齿的拨转,田间条铺花生植株被引入螺旋叶片左右分布的螺旋输送器,经螺旋输送器集中后推送到输送机构,再由链耙式输送器推送经喂入口进入摘果装置进行果秧分离,然后在清选装置中经分离、除杂后的净荚果由提升装置导入果箱,碎秧、杂余由负压风机引入集秧箱。尾部碎秧、杂余经机尾负压风机引抛到机身身后已捡拾区,最后由高位卸果装置将果箱内荚果卸出,完成收获。

2 捡拾装置设计

2.1 花生几何参数及力学特性

试验对象为摊铺晾晒后的花生株系,试验前先用花生挖掘机有序起秧、振动去土后自然落地按序叠层铺放至原种穴一侧,如图3所示, W 为试验幅宽,mm; Z 为铺放间距,mm; S 为花生株系条铺宽度,mm; h 为秧蔓层叠高度,mm。以主产区典型品种“开农61”为试验对象,经统计该品种的带果高度为 (400 ± 20) mm,茎秆中径 (8 ± 1) mm;结果区域中径为 (135 ± 10) mm,结果区域高度为 (150 ± 10) mm,果柄直径 (1 ± 0.5) mm,果壳厚度为在1.0~2.6 mm,平均为2.1 mm,单个荚果的质量在1.5~3.4 g,平均为2.5 g,由于荚果在机械化捡拾过程中极易损伤、脱落,了解其力学特性可为捡拾机构的参数设计提供参考。研究表明,其力学特性受含水率影响较大,果柄的临界脱落力一般为4.0~7.2 N,果壳临界破损力一般为24.2~40.6 N。

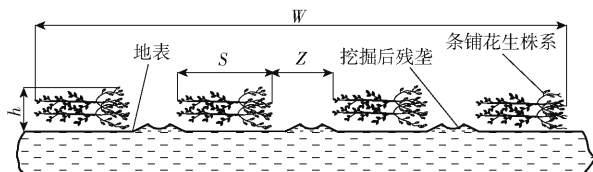


图3 花生挖掘后摊铺晾晒示意图

Fig.3 Schematic of spreading and drying peanuts after digged

2.2 弹齿捡拾装置

捡拾是花生捡拾收获机的核心技术,捡拾过程中要求保持花生植株的完整性,防止或减少漏捡、落果及荚果损伤。捡拾质量也直接影响后续摘果、清选的质量。捡拾装置(图4)主要由左侧板、捡拾弹齿、弧形护罩、弹齿座、传动轴、压秧杆、支撑圆盘、右侧板及链轮等组成,捡拾装置的主要参数有捡拾弹齿长度、弹齿直径及弧形护罩间距。捡拾装置作用是有序捡秧、平稳输秧及平顺送秧,需要解决的主要问题是荚果漏捡、落果及荚果损伤。

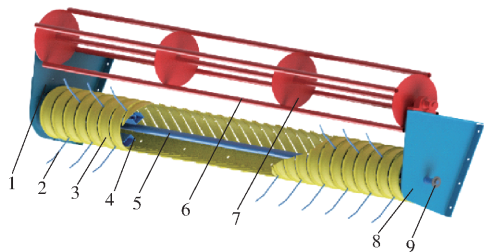


图 4 捡拾装置轴测图

Fig. 4 Axonometric drawing of picking-up mechanism

1. 左侧板 2. 捡拾弹齿 3. 弧形护罩 4. 弹齿座 5. 传动轴
6. 压秧杆 7. 支撑圆盘 8. 右侧板 9. 链轮

2.2.1 弹齿与秧蔓、荚果作用力学分析

弹齿与秧蔓、莖果的作用如图 5 所示。莖-柄脱

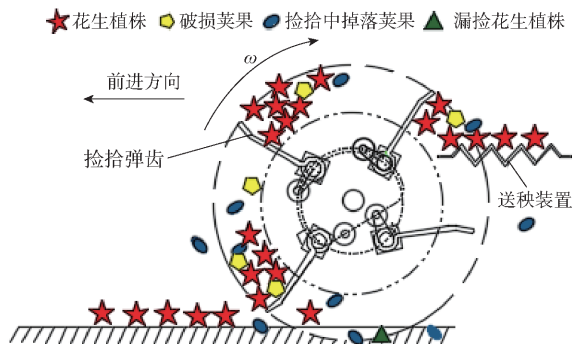


图 5 捡拾装置原理图

Fig. 5 Schematic of pickup mechanism

离、荚果的破损是由捡拾装置旋转扯拉和弹性挑拨使花生秧蔓、荚果瞬间由静止做变速运动,由此产生的冲击合力克服秧蔓、荚果与秧蔓群的缠绕交织混合力,导致秧蔓、荚果被弹齿组件捡拾。此过程中部分荚果受弹齿挑拨冲击、旋转扯拉及滑移摩擦作用,荚果破损或荚果与果柄断开,荚果落至地面,造成收获损失,影响整机收获质量。

为探寻影响花生荚-柄的脱离、荚果的破损力学机理,将受力荚果简化成球形分析(图6),收获机以

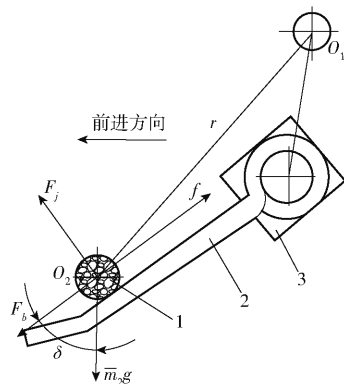


图 6 花生荚果受力简图

Fig.6 Mechanical diagram of peanut pods

1. 荚果 2. 捡拾弹齿 3. 弹齿安装座

速度 v_m 向前运动,条铺秧蔓与弹齿接触瞬间,由于弹齿转速高,花生荚果在弹齿组的撞击作用下,迅速产生一个速度 v_j ,即在极短时间内,花生荚果的速度由 0 迅速增大到 v_j ,此过程中,花生荚果与弹齿组发生剧烈碰撞,弹齿组部分动能转化为花生荚果动量,花生荚果受到较大的冲击力 F_j ,根据动量定理,符合关系式^[11-15]

$$m_t v_t = (k_1 \bar{m}_1 + m_t) v_i \quad (1)$$

$$F_j = \frac{\overline{m_1 v_j}}{\Delta t} \quad (2)$$

其中 $\Delta t = \frac{d_k}{v}$ (3)

式中 m_t ——弹齿质量,取 0.41 kg

v_t ——撞击时弹齿线速度, m/s

- k_1 ——碰撞瞬间荚果个数,取 5
- $\overline{m}_1$ ——单个荚果平均质量,kg
- Δt ——碰撞时间,s
- $\overline{v}$ ——弹齿撞击瞬间平均速度,m/s
- d_k ——荚果果壳厚度,为 0.81 ~ 2.78 mm

当弹齿组转速为 60 r/min 时, v_j 为 2.86 m/s,则由式(1) ~ (3)可得碰撞后瞬间共同速度为 2.86 m/s,由于 $2.86 \text{ m/s} < \overline{v} < 2.91 \text{ m/s}$,则 Δt 为 0.000 27 ~ 0.000 97 s,单个荚果平均质量为 0.002 5 kg,则由式(2)可得 F_j 为 7.3 ~ 26.48 N。

捡拾碰撞瞬间,蔓果层与弹齿组往往发生碰撞滑动摩擦力,导致果柄断裂造成落果损失,当该力小于根柄或果柄连接力时,花生荚果不能从株系脱落,此时应符合关系式^[16-19]

$$\mu_1(F_j - k_2\overline{m}_2g\sin\delta) - F_b - k_2\overline{m}_2g\cos\delta \leq 0 \quad (4)$$

- 式中
- k_2 ——碰撞瞬间植株个数,取 2
 - μ_1 ——荚果与弹齿接触动摩擦因数,取 0.5
 - $\overline{m}_2$ ——单株被撞击荚果的平均个数
 - F_b ——果柄脱离力,N
 - δ ——荚果下滑方向与重力方向夹角,(°)
 - g ——重力加速度,m/s²

由式(4)可得 $F_j \leq 14.18 \text{ N}$ 时,荚果落果率较低。

为减少捡拾落果损失,花生荚果撞击后产生的碰撞滑摩擦力应小于花生荚果最大脱离力且应尽可能小,在材料和结构参数一定条件下,决定弹齿转动能量和冲击力的因素主要是弹齿转速,式(1)计算前提是弹齿组转速为 60 r/min,弹齿转速越低,荚果落果损失越小,但捡拾效率越低,因此选择合适的弹齿转速区间至关重要,根据文献[17,20],不同作业条件下,弹齿转速一般为 50 ~ 90 r/min。

2.2.2 弧形护罩设计

弧形护罩的作用是辅助捡拾弹齿完成有序捡秧、平稳输秧及平顺送秧,在捡拾弹齿挑捡秧蔓旋转上升过程中,部分荚果会进入两相邻弹齿间隙内(图 7),造成荚果被弧形护罩内侧拉扯掉落或造成表面损伤,因此研究相邻弧形护罩间距与荚果作用关系十分重要。

花生荚果三轴尺寸如图 8 所示,其三轴尺寸定义为:长度 x_j (x 方向)、厚度 y_j (y 方向)、两子叶结合面的垂直方向)、宽度 z_j (z 方向),根据图 7,捡拾弹齿弧形护罩共同配合完成带果秧蔓的捡拾和旋转输运,应满足条件

$$\begin{cases} d < y_j \\ d < z_j \\ 2k_z + 3d \leq S \end{cases} \quad (5)$$

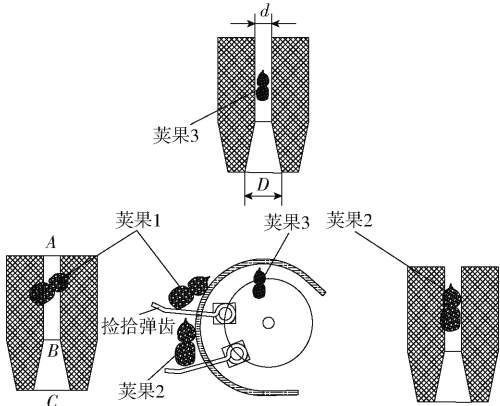


图 7 弧形护罩间隙对荚果影响示意图
Fig. 7 Influence diagram of arc shield gap on pods

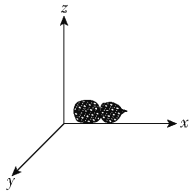


图 8 花生荚果三轴尺寸图
Fig. 8 Triaxial size diagram of peanut pods

- 式中
- d ——相邻两弧形护罩间的距离,mm
 - S ——花生植株条铺宽度,mm
 - k_z ——弹齿弧形护罩宽度,mm

田间统计分析表明,含水率低于 20% 时,“开农 61”荚果的三轴平均尺寸为 25、12、13 mm,而植株平均长度为 400 mm,因此,取 d 为 10 mm,为使弹齿稳定托撑秧蔓及荚果,每株横向花生株系在被捡拾上升过程中,由 3 根捡拾弹齿支撑,取 k_z 为 150 mm。

3 摘果装置设计

3.1 摘果装置结构及摘果机理

轴流式花生捡拾收获机摘果装置主要由左右侧板、进秧口、钉齿摘果滚筒、导流板、凹板筛、排秧口、螺旋输送机、主带轮构成(图 9)。左侧主带轮可以实现动力的输入,进秧口位于导流板左前方,钉齿摘果滚筒位于导流板与主凹板筛之间,其右下方为螺旋输送机。

沿进秧口进入的待摘花生植株,一方面在导流板引导作用下,沿钉齿摘果滚筒自左向右半螺旋流动(图 10),同时在高速旋转的摘果滚筒带动下沿周向做高速旋转运动,此过程中花生植株受到导流板的摩擦与钉齿摘果滚筒旋转撞击、揉搓,分离成断枝断秧和荚果,在旋转离心力的作用下被甩到主、副凹板筛栅条的空隙中,荚果在重力下穿过空隙落到下方的振动筛上,断枝残秧则通过排秧口排到机外。

钉齿摘果滚筒主要设计参数为:钉齿摘果滚筒回转直径 D 与长度 L 、凹板筛间距 L_1 、摘果钉齿排数

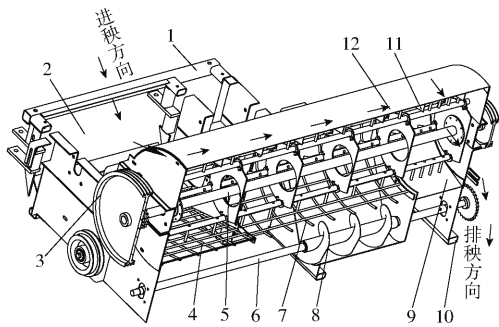


图 9 摘果装置轴测图

Fig. 9 Axonometric drawing of pods picked device

1. 进秧口机架 2. 进秧口 3. 主带轮 4. 底筛 5. 传动轴 6. 螺旋输送机传动轴 7. 凹板筛 8. 螺旋输送机 9. 排秧口 10. 排秧口机架 11. 导流板 12. 顶罩

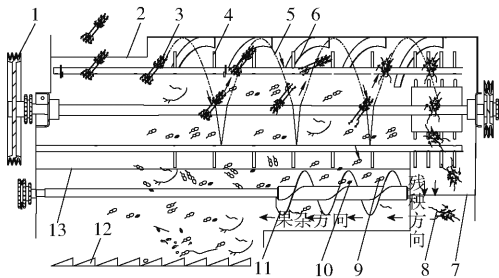


图 10 摘果装置工作原理图

Fig. 10 Schematic of working principle of pods picked device

1. 主带轮 2. 进秧口 3. 带果秧蔓 4. 摘果钉齿 5. 秧蔓轨迹 6. 导流板 7. 排秧口 8. 去果残秧 9. 荚果 10. 碎叶 11. 螺旋输送机 12. 逐稿器 13. 凹板筛

M_3 、摘果滚筒转速 n 等。

3.2 荚果与导流板接触受力分析

荚果在导流板碰撞摩擦作用下(图 11),沿钉齿摘果滚筒自右向左轴向流动过程中,荚果与植株脱离时,需满足

$$\begin{cases} N_1 \cos \theta - F_l - f_1 - k_3 \bar{m}_1 g \cos \theta \geq 0 \\ f_1 = \mu_2 N_1 \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

式中 N_1 ——荚果受秧蔓群合力, N

θ ——导流板导流角, ($^\circ$)

F_l ——果柄、荚果分离力, N

f_1 ——导流板对荚果的摩擦力, N

k_3 ——碰撞瞬间荚果个数

μ_2 ——荚果与导流板间动摩擦因数

荚果果壳临界破损力一般在 24.2 ~ 40.6 N, 结合式(6), N_1 应满足

$$\frac{F_l + k_3 \bar{m}_1 g \cos \theta}{\cos \theta - \mu_2 \sin \theta} \leq N_1 \leq 24.2 \text{ N} \quad (7)$$

由于 $\bar{m}_1$ 较小, 可忽略不计, 而果柄的临界脱落力一般在 0.8 ~ 7.2 N, F_l 取最大值 7.2 N, 荚果与导流板的动摩擦因数 μ_2 为 0.5, 代入式(7)得 $\theta \leq 40^\circ$, 为加强摘果效率同时考虑摘果效果, 本设计取 35° 。

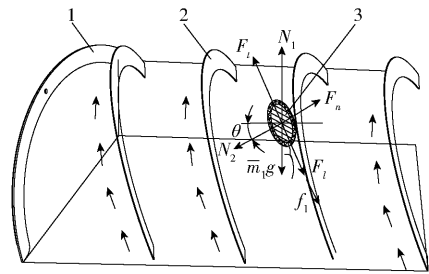


图 11 荚-柄脱离时荚果受力简图

Fig. 11 Schematic of pod forced by guide plate

1. 左侧板 2. 导流板 3. 荚果

3.3 摘果滚筒长度及直径的确定

钉齿摘果滚筒的长度以及面板宽度的取值直接关系到摘果时间的长短, 从而影响到荚果的摘净率以及生产效率。摘果时间越长, 摘果率就越大。为了提高花生摘果过程中的摘果率, 需要给花生摘果留有充分的时间; 又由于进入到摘果辊筒内的花生植株是做螺旋运动, 且滚筒越长, 荚果被打击次数越多, 摘净率越高, 但荚果破损率也随之升高, 摘果滚筒长度为^[21]

$$L = a \left(\frac{Z}{K} - 1 \right) + 2l_1 \quad (8)$$

式中 a ——齿迹距, mm

Z ——单排摘果钉齿个数

K ——螺线头数

l_1 ——端部钉齿到滚筒端部距离, mm

为提高摘果效率同时降低摘果功耗, 摘果钉齿在滚筒上呈单螺旋排列, 谷物脱粒滚简单排摘果钉齿个数 Z 设计为 30, 齿迹距一般为 25 ~ 50 mm, 结合滚筒空间布置, 取 $l_1 = 25$ mm, $a = 40$ mm, 则可得摘果滚筒长度为 1 210 mm。

摘果滚筒直径为

$$D = \frac{M_3 S_3}{\pi} + 2h_2 \quad (9)$$

式中 h_2 ——摘果钉齿高度, mm

S_3 ——每排摘果钉齿展开间距, mm

摘果滚筒直径太小容易缠绕花生秧蔓, 造成堵塞, 降低摘果效率, 直径过大则加大功耗和荚果破损率, 参考谷物常用滚筒的直径为 400 ~ 600 mm, 结合田间试验取 D 为 500 mm。

3.4 荚果与摘果钉齿接触受力分析

荚果与摘果钉齿间作用如图 12 所示, 由于摘果滚筒转速越大, 摘果钉齿线速度越高, 造成荚果破损率越高, 根据赫兹接触理论, 荚果与摘果钉齿接触瞬间, 最大接触压力 F_0 应满足

$$\begin{cases} F_0 = d_2 \left[\frac{5}{4} \pi E^{*4} \rho (D \pi n)^2 \right]^{\frac{1}{5}} \sqrt{bd_0} \\ \lambda_1 F_2 \leq F_0 \leq \lambda_2 F_3 \end{cases} \quad (10)$$

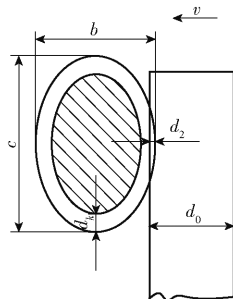


图 12 荚果与摘果钉齿碰撞简图

Fig. 12 Schematic of collision between pods and picking nails

式中 d_2 ——最大接触位移, m

E^* ——等效弹性模量, 取 1.0×10^6 Pa

ρ ——荚果密度, kg/m^3

b ——荚果短轴长度, 取 0.01 m

d_0 ——摘果钉齿半径, 取 0.01 m

F_2 ——果柄断裂最大临界力, N

F_3 ——荚果果壳破损最小临界力, N

λ_1 ——果柄的临界脱落力系数, 取 1.2

λ_2 ——荚果破损系数, 取 0.6

通过式 (10) 可得: $3\,000\text{ mm} \cdot \text{r/s} \leq Dn \leq 5\,000\text{ mm} \cdot \text{r/s}$, 当 $D = 500\text{ mm}$ 时, $6\text{ r/s} \leq n \leq 10\text{ r/s}$, 即 n 为 360 ~ 600 r/min, 在摘果滚筒长度及直径确定后, 摘果滚筒转速是影响摘净率、荚果破损率的主要因素, 且滚筒转速越高, 荚果单位时间被打击次数越多, 摘净率越高, 但荚果破损率也随之升高, 参照常 见摘果滚筒的转速范围 (400 ~ 600 r/min), 同时为降低功耗, 确定摘果滚筒转速为 400 ~ 500 r/min。

3.5 摘果钉齿参数优化

目前普遍使用的花生摘果滚筒上的摘果齿有弯齿式和钉齿式两种。前者虽然可以通过弓齿倾斜固定产生轴向推力、使花生植株沿轴向运动, 但植株容易造成缠绕且摘果范围较小^[22]。钉齿式摘果齿可减少秧蔓缠绕, 摘果通畅性较好, 因此本设计选用钉齿, 但由于钉齿自身不能产生轴向推力, 选用导流板与其配合, 通过导流板, 引导进入带果秧蔓沿中心轴向自右向左输送, 有效增加摘果行程, 但由于钉齿与花生植株接触面积小, 碰撞时会增加荚果破损率, 同时会造成断枝断秧增多, 不利于后续清选。因此对钉齿结构参数及排列进行研究。

钉齿与滚筒轴的轴向安装夹角对荚果破碎率和秧杂流动顺畅性影响较大, 钉齿形状如图 13 所示。

为获得最佳钉齿夹角, 对不同钉齿夹角安装方式 (45°, 60°, 90°, 120°, 135°) 的摘果滚筒的摘果通畅性 (壅堵次数) 和摘果质量 (荚果破损率) 进行对比试验。试验用花生品种为“开农 61”, 试验喂入量约 2.5 kg/s, 蔓果综合含水率为 28%, 果部土壤残

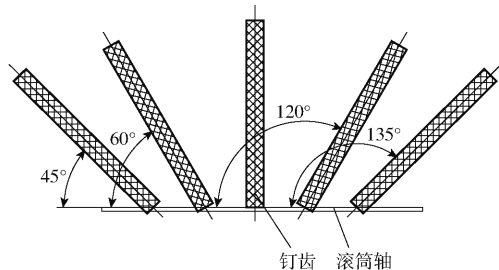


图 13 钉齿不同安装角度简图

Fig. 13 Schematic of different installation angles of nail

留质量比例约为 2.4%, 试验时将不同角度的摘果钉齿安装在对应摘果滚筒上, 然后安装于本课题组研制的收获试验台上, 试验工作参数为: 摘果滚筒转速 450 r/min、钉齿直径 20 mm、钉齿长度 50 mm, 每种角度进行 5 组重复试验, 每组试验喂入量 300 kg, 观测其平均壅堵次数、平均荚果破损率。测量装置包括: 电子天平 (精度 0.01 g, 上海海康电子仪器厂)、电子吊秤 (永康市泰高五金厂)、转速表 (北京飞博尔电子公司)。

试验结果为: 钉齿 45°、60°、90°、120°、135° 5 种安装角度的壅堵次数分别为 3、2、0、2、2 次; 荚果破损率分别为 3.2%、2.1%、1.7%、2.3%、3.5%。

分析原因可知: 以 45° 钉齿安装角进行作业时, 秧蔓和荚果受钉齿和钉齿滚筒轴间形成的狭小空间的影响, 容易夹秧、缠秧, 秧蔓流动通畅性受到影响, 缠绕后荚果受到多次击打, 造成破损率增加。当安装角增大为 60° 时, 钉齿和钉齿滚筒轴之间的空间变大, 壅堵次数和荚果破损率有所减小, 当安装角增大为 90° 时, 秧蔓的缠秧量最小, 流动状态最好, 壅堵次数和荚果破损率最小。钉齿安装角为 120° 和 135° 时, 由于钉齿和钉齿滚筒轴存在的狭小空间分别与 60° 和 45° 相同, 因此, 选择钉齿安装角为 120°。为进一步在减少荚果破损率的同时提升摘果效率, 钉齿材料选择耐磨性好的丁苯橡胶^[23]。

4 试验

4.1 试验条件与指标

4.1.1 试验条件

试验于 2019 年 9 月 10—15 日在河南省驻马店市遂平县试验基地进行 (图 14)。试验花生品种为“开农 61”, 单垄双行种植, 垄距 800 mm, 株距 285 mm, 产量 5 000 kg/hm²。试验地晾晒 3 d 后秧蔓含水率 18.65%, 荚果含水率 20.42%, 果柄含水率 16.97%, 带果秧蔓平均长度 40 mm, 以人工铺设秧蔓模拟人工挖掘收获后的全量秧蔓荚果。果蔓比均值为 1.2, 均匀铺设密度为 25 kg/m² (大于挖掘收获

条铺量),试验地块面积 15 000 m² (100 m × 150 m),土壤类型为沙壤土,在 0 ~ 10 cm 深度处土壤含水率为 16.53%,土壤坚实度为 0.78 MPa,土壤容重 1.1 g/cm³。试验前由挖掘机收获,人工去荚果土壤后铺放于田间,秧蔓铺放密度为 15 株/m²。



图 14 田间试验
Fig. 14 Field test site

4.1.2 试验指标及测试方法

试验前进行花生秧蔓田间铺放情况检查,测试按 GB/T 5262—2008 进行。测试参照国家标准 GB/T 5667—2008《农业机械生产试验方法》、农业行业标准 NY/T 502—2016《花生收获机试验质量》和 NY/T 2204—2012《花生收获机械质量评价技术规范》中的方法及规范,测试内容主要包括捡拾率、荚果损失率、单位捡拾功耗。

将试验区划分为 30 个测试区,每个测区长 100 m,捡拾幅宽 2 500 mm,进行 30 次试验,在 30 个测试区上随机取 10 个测试区。捡拾机构配置于课题组自行研制的轴流式花生捡拾收获试验台上,保持试验台匀速行驶,捡拾装置高度保持恒定,试验员驾驶收获机在田间进行捡拾试验。测试仪器包括转速测试仪、米尺、电子秤等。

4.2 性能试验

4.2.1 试验设计与方法

选取对收获质量影响较大的弹齿转速 A 、摘果滚筒转速 B 、机具前进速度 C 作为试验因素。其他试验参数为弹齿滚筒长度 2 500 mm、弹齿个数 156 及弹齿直径 5 mm,4 排弹齿周向均布,钉齿长度 50 mm、钉齿直径 20 mm。试验以捡拾率 Y_1 、荚果损失率 Y_2 (包括捡拾荚果掉落和捡拾、摘果过程中的荚果破损)、生产率 Y_3 作为指标,开展三因素三水平正交试验^[24-26],试验因素与水平见表 2。

表 2 试验因素与水平

Tab. 2 Factors and levels of experiment

水平	因素		
	弹齿转速	摘果滚筒转速	机具前进速度
	$A/(r \cdot \min^{-1})$	$B/(r \cdot \min^{-1})$	$C/(m \cdot s^{-1})$
1	50	400	1.0
2	70	450	1.3
3	90	500	1.6

4.2.2 数据分析与处理

试验数据采用 Design-Expert 软件进行二次多项式回归分析,并利用响应面分析法对各因素相关性和交互效应的影响规律进行分析研究。

5 试验结果与分析

根据 Box - Behnken 试验原理设计分析试验,共 17 个试验点。试验方案与结果如表 3 所示。

表 3 试验设计方案与结果

Tab. 3 Experiment design and result

序号	$A/$ $(r \cdot \min^{-1})$	$B/$ $(r \cdot \min^{-1})$	$C/$ $(m \cdot s^{-1})$	捡拾率 $Y_1/\%$	荚果损 失率 $Y_2/\%$	生产率 $Y_3/$ $(\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1})$
1	70	450	1.3	95.34	2.53	0.51
2	70	450	1.3	95.92	3.16	0.56
3	50	500	1.3	97.26	3.64	0.46
4	70	400	1.6	94.71	2.81	0.65
5	50	400	1.3	97.55	1.67	0.42
6	90	400	1.3	92.82	1.93	0.61
7	50	450	1.0	99.63	2.36	0.39
8	90	500	1.3	91.44	4.72	0.58
9	70	500	1.0	96.85	3.97	0.41
10	90	450	1.6	87.27	3.43	0.74
11	50	450	1.6	96.12	2.80	0.63
12	90	450	1.0	93.43	3.35	0.44
13	70	450	1.3	94.91	2.77	0.58
14	70	500	1.6	93.52	4.83	0.41
15	70	400	1.0	96.11	2.11	0.74
16	70	450	1.3	96.43	2.58	0.63
17	70	450	1.3	95.12	2.74	0.44

5.1 回归模型建立与显著性检验

利用 Design-Expert 软件对表 3 中的数据开展多元回归拟合分析,建立 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 对 A 、 B 、 C 的响应面回归模型

$$Y_1 = 0.1023 + 0.0018A + 0.0001B + 0.001C + 0.0002AB + 0.0004AC + 0.0003BC + 0.0006A^2 - 0.0001B^2 + 0.0003C^2 \quad (11)$$

$$Y_2 = 2.76 + 0.37A + 1.1B + 0.2763C + 0.205AB - 0.09AC + 0.0725BC - 0.1218A^2 + 0.3557B^2 + 0.3508C^2 \quad (12)$$

$$Y_3 = 0.5860 + 0.0213A + 0.0075B + 0.1513C + 0.0125AB + 0.0075BC + 0.0395A^2 + 0.0270B^2 - 0.0355C^2 \quad (13)$$

通过表 4 分析结果可知,捡拾率 Y_1 、荚果损失率 Y_2 、生产率 Y_3 的 P 值分别为 0.001 7、0.000 6、 <0.0001 (均小于 0.05),表明 3 个模型影响极显著。其失拟项的 P 值分别为 0.072 2、0.333 8、0.087 3 (均大于 0.05),表明 3 个模型拟合程度较高;其决定系数 R^2 分别为 0.940 0、0.955 7、

表 4 回归方程方差分析

Tab.4 Variance analysis of regression equation

方差来源	捡拾率 Y_1				荚果损失率 Y_2				生产率 Y_3			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	0.311 8	9	12. 19	0. 001 7	0.996 7	9	16. 78	0. 000 6	0.088 7	9	39. 82	<0. 000 1
A	0.217 8	1	76. 65	<0. 000 1	0.087 0	1	13. 18	0. 008 4	0.001 4	1	5. 84	0. 046 4
B	0.001 5	1	0. 534 7	0. 488 4	0.774 8	1	117. 36	<0. 000 1	0.000 2	1	0. 758 6	0. 412 6
C	0.069 2	1	24. 34	0. 001 7	0.047 6	1	7. 21	0. 031 3	0.079 7	1	322. 11	<0. 000 1
AB	0.000 8	1	0. 287 9	0. 608 2	0.007 0	1	1. 07	0. 336 4	0.000 2	1	0. 999 2	0. 350 8
AC	0.005 4	1	1. 89	0. 211 2	0.003 3	1	0. 504 0	0. 500 7	<0. 000 1	1	0. 013 9	0. 909 6
BC	0.002 5	1	0. 862 5	0. 383 9	0.000 0	1	0. 004 5	0. 948 4	0.000 0	1	0. 160 9	0. 700 3
A^2	0.011 4	1	4. 03	0. 084 8	0.007 2	1	1. 08	0. 332 3	0.002 5	1	10. 20	0. 015 2
B^2	0.000 5	1	0. 191 8	0. 674 6	0.022 4	1	3. 39	0. 108 1	0.001 3	1	5. 23	0. 056 1
C^2	0.002 5	1	0. 866 1	0. 383 0	0.046 8	1	7. 08	0. 032 4	0.003 6	1	14. 40	0. 006 8
残差	0.019 9	7			0.046 2	7			0.001 7	7		
失拟	0.015 8	3	5. 21	0. 072 2	0.024 6	3	0. 52	0. 333 8	0.001 3	3	4. 60	0. 087 3
误差	0.004 0	4			0.021 6	4			0.000 4	4		
总和	0.331 7	16			1. 04	16			0.090 4	16		

0.979 0,表明 94% 以上的响应值均可以由这 3 个模型解释,因此,该模型可以预测捡拾机构的工作参数。

5.2 交互因素对性能指标的影响分析

根据表 2 结果,考察弹齿转速 A、摘果滚筒转速 B 及机具前进速度 C 交互作用对各性能指标的影

响,并利用 Design-Expert 软件绘制响应面交互因素对拾落果率 Y_1 影响响应面如图 15 所示。图 15a 表明减小弹齿转速 A 有助于降低捡拾率;图 15b 表明减小弹齿转速 A 与机具前进速度 C 明显有助于增加捡拾率;图 15c 表明减小机具前进速度 C 有助于增加捡拾率。

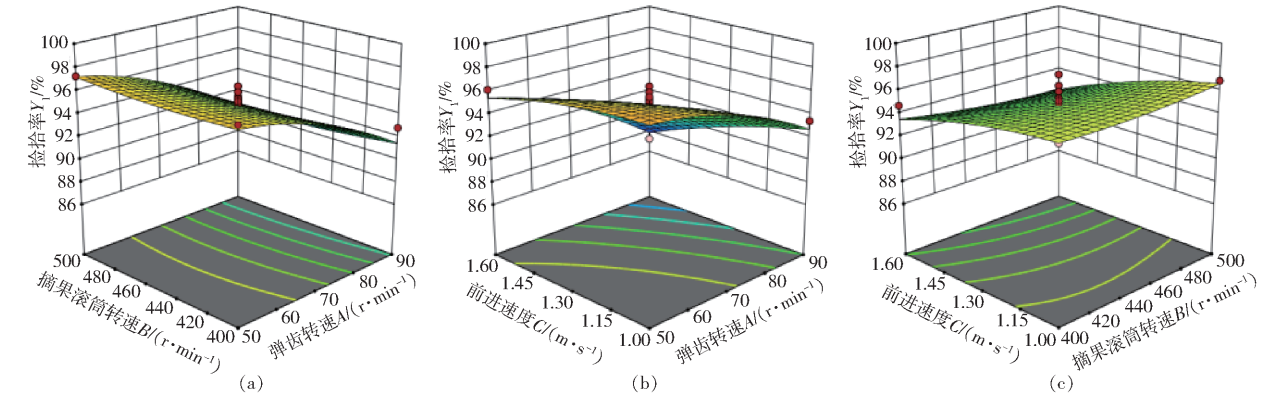


图 15 交互因素对捡拾率影响的响应曲面

Fig. 15 Response surface diagrams of interactive factors to picking-up rate

交互因素对荚果损失率 Y_2 影响响应面如图 16 所示。图 16a 表明减小弹齿转速 A 和摘果滚筒转速 B 有助于降低荚果损失率,图 16b 表明减小弹齿转速 A 与机具前进速度 C 明显有助于降低荚果损失率,图 16c 表明减小摘果滚筒转速 B 和机具前进速度 C 有助于降低荚果损失率。

交互因素对生产率影响响应面如图 17 所示,图 17a 表明增加弹齿转速 A 和摘果滚筒转速 B 对生产率 Y_3 影响不显著;图 17b 表明增加机具前进速度 C 明显有助于增加生产率 Y_3 ;图 17c 表明增大机具前进速度 C 显著增加生产率 Y_3 。

5.3 参数优化

根据捡拾率 Y_1 、荚果损失率 Y_2 及生产率 Y_3 数学模型,可以在约束条件范围内选取捡拾机构的最优参数组合并对回归模型进行检验。以最大捡拾率 Y_1 、最小荚果损失率 Y_2 及最大生产率 Y_3 为评价指标,建立优化数学模型

$$\begin{cases} \max Y_1(A, B, C) \\ \min Y_2(A, B, C) \\ \max Y_3(A, B, C) \\ \text{s. t. } \begin{cases} 50 \text{ r/min} \leq A \leq 90 \text{ r/min} \\ 400 \text{ r/min} \leq B \leq 500 \text{ r/min} \\ 1.0 \text{ m/s} \leq C \leq 1.6 \text{ m/s} \end{cases} \end{cases}$$

(14)

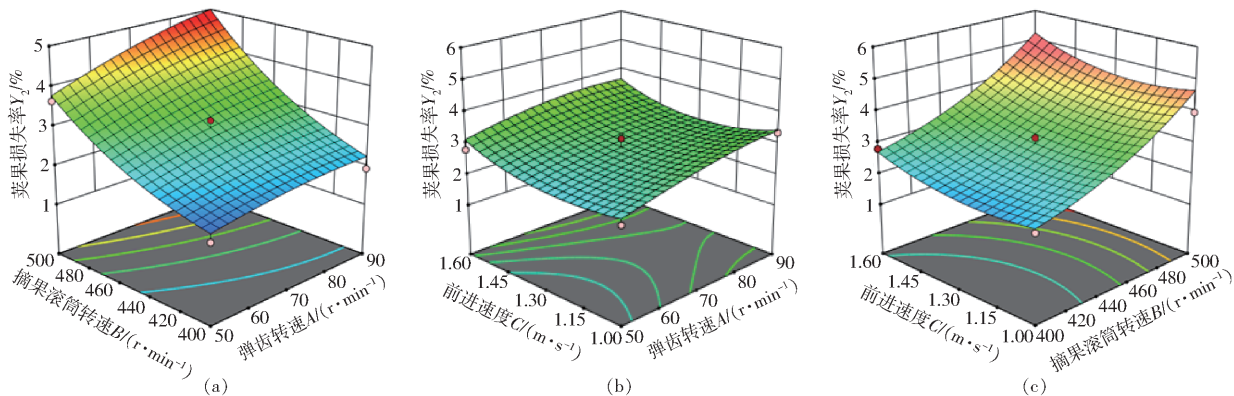


图 16 交互因素对荚果损失率影响的响应曲面

Fig. 16 Response surface diagrams of interactive factors to pod loss rate

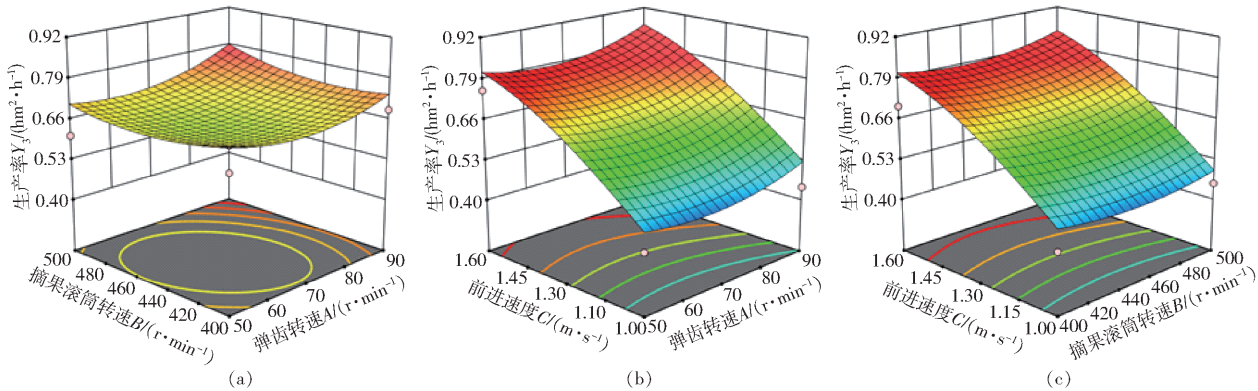


图 17 交互因素对生产率影响的响应曲面

Fig. 17 Response surface diagrams of interactive factors to productivity

利用 Design-Expert 软件优化求解模块可求得满足约束条件的最大捡拾率 Y_1 、最小荚果损失率 Y_2 及最大生产率 Y_3 的最优参数组合。求解的最优参数组合为：弹齿转速 67.81 r/min、摘果滚筒转速 447.25 r/min、机具前进速度 1.36 m/s，对应的捡拾率为 98.96%、荚果损失率为 2.18%、生产率为 0.62 hm^2/h 。

由于实际工作参数很难调整到理论求解的优化值，选择一组接近优化值的参数进行田间试验，参数值为：弹齿转速 68 r/min、滚筒转速 447 r/min 及机具前进速度 1.4 m/s。试验于 2019 年 9 月 20 日在相同地点采用相同的测试方法进行，捡拾率、荚果损失率及生产率平均值分别为 98.62%、2.11%、0.61 hm^2/h 。与切流板齿滚筒式花生捡拾收获机常用的一组参数收获同等条件下的条铺晾晒花生时对比，对应的捡拾率、生产率分别提高了 2.1、4.5 个百分点，荚果损失率降低了 0.9 个百分点，综合性能明显改善。

6 结论

(1)设计了一种轴流式花生全喂入收获机，该

机一次下田可对挖掘后成条铺放的花生完成捡拾，比现有花生捡拾收获机捡拾率高、荚果损失率低、生产率高，减少了人工成本。

(2)在分析整机工作原理的基础上，进行了关键部件的结构设计及参数确定，并根据花生植株力学特性对弹齿与秧蔓、荚果作用进行力学分析，得出捡拾弹齿对荚果的撞击力范围和荚果脱落条件；对荚果和导流板进行力学分析，得出荚果与植株脱离的条件，并运用赫兹接触理论对摘果过程中的荚果和摘果钉齿撞击进行分析，得出摘果滚筒直径和摘果滚筒转速的关系表达式。

(3)基于 Box - Behnken 中心组合设计理论，以弹齿转速、摘果滚筒转速、机具前进速度作为影响因子，进行正交试验研究，分析各因素对捡拾率、荚果损失率和生产率的影响，并对工作参数进行优化。结果表明，最优参数组合为弹齿转速 68 r/min、摘果滚筒转速 447 r/min 及机具前进速度 1.4 m/s，对应的捡拾率为 98.62%、荚果损失率为 2.11%、生产率为 0.61 hm^2/h ，捡拾率、生产率比优化前分别提高了 2.1、4.5 个百分点，荚果损失率比优化前降低了 0.9 个百分点，综合性能明显提高。

参 考 文 献

- [1] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 88-94. http://www.csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151114&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.014. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] ANTIAOBONG E A, BHATTA RAI K R. Growth trends and sources of output growth for oil palm and groundnut production in Nigeria(1961—2007)[J]. Trends in Agricultural Economics, 2012, 5(3): 96-103.
- [4] 杨然兵,柴恒辉,尚书旗.花生联合收获机弹齿式去土装置设计与性能试验[J/OL].农业机械学报,2014,45(8):66-71,92. YANG Ranbing, CHAI Henghui, SHANG Shuqi. Design and parameters analyses of automatic height profiling device of quadratebale baler pickup[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 66-71, 92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140811&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.011. (in Chinese)
- [5] 胡志超,王海鸥,王建楠,等.4HLB-2型半喂入花生联合收获机试验[J].农业机械学报,2010,41(4):79-84. HU Zhichao, WANG Haiou, WANG Jiannan, et al. Experiment on 4HLB-2 type half feed peanut combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 79-84. (in Chinese)
- [6] 王冰,胡志超,彭宝良,等.半喂入四行花生联合收获机弹指筛结构运行参数优化[J].农业工程学报,2017,33(21):20-28. WANG Bing, HU Zhichao, PENG Baoliang, et al. Structure operation parameter optimization for elastic steel pole oscillating screen of semi-feeding four rows peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 20-28. (in Chinese)
- [7] 孙玉涛,尚书旗,王东伟,等.美国花生收获机械现状与技术特点分析[J].农机化研究,2014,36(4):7-11. SUN Yutao, SHANG Shuqi, WANG Dongwei, et al. The development status of peanut harvest in America[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(4): 7-11. (in Chinese)
- [8] 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/OL].农业机械学报,2016,47(11):106-113. CHEN Zhongyu, GUAN Meng, GAO Lianxing, et al. Design and test on axail flow peanut picking device with screw bending teeth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 106-113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161114&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.014. (in Chinese)
- [9] 王东伟,尚书旗,韩坤,等.4HJL-2型花生捡拾摘果联合收获机的设计与试验[J].农业工程学报,2013,29(11):27-36. WANG Dongwei, SHANG Shuqi, HAN Kun, et al. Design and test of 4HJL-2 harvester for peanut picking-up and pods-picking[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(11): 27-36. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 盛凯,曾南宏.弹齿滚筒捡拾器的机构特性及其运动数学模型[J].农业机械学报,1991,22(1):51-57. SHENG Kai, ZENG Nanhong. The mechanical feature and motional math model of spring-finger cylinder pickups[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1991, 22(1): 51-57. (in Chinese)
- [12] 王振华,王德成,刘贵林,等.方草捆压捆机捡拾器参数设计[J].农业机械学报,2010,41(增刊):107-109. WANG Zhenhua, WANG Decheng, LIU Guilin, et al. Pickup parameters design of square baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 107-109. (in Chinese)
- [13] BAI Xuewei, ZHAO Ping, LI Yongkui, et al. Model analysis of a type of square baler's framework[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology, 2011:1769-1772.
- [14] 谢建华,侯书林,付宇,等.残膜回收机弹齿式拾膜机构运动分析与试验[J/OL].农业机械学报,2013,44(增刊1):94-99. XIE Jianhua, HOU Shulin, FU Yu, et al. Motion analysis and experiment on spring-teeth mulching plastic film collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 94-99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s118&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/jissn.1000-1298.2013.S1.018. (in Chinese)
- [15] 赵岩,郑炫,陈学庚,等. CMJY-1500型农田残膜捡拾打包联合试验机设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(5):1-9. ZHAO Yan, ZHENG Xuan, CHEN Xuegeng, et al. Design and test of CMJY-1500 type plastic film residue collecting and balling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 1-9. (in Chinese)
- [16] 康建明,王士国,颜利民,等.残膜回收机起膜铲设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(增刊):143-148. KANG Jianming, WANG Shiguo, YAN Limin, et al. Design and experiment of loosen shovel installed on plastic film collecting machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 143-148. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s022&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/jissn.1000-1298.2016.S0.022. (in Chinese)

- quality during head-feeding combine harvester operation[J]. *Machines*, 2015, 3(4): 352–363.
- [19] MAHIRAH J, KAZUYA Y, MUNENORI M, et al. Monitoring harvested paddy during combine harvesting using a machine vision-Double lighting system[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2017, 10(2): 140–149.
- [20] MD ABDUL M, KAZUYA Y, MUNENORI M, et al. Machine vision based soybean quality evaluation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 140(2): 452–460.
- [21] 陈进, 顾琰, 练毅, 等. 基于机器视觉的水稻杂质及破碎籽粒在线识别方法[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(13): 187–194.
CHEN Jin, GU Yan, LIAN Yi, et al. Online recognition method of impurities and broken paddy grains based on machine vision [J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(13): 187–194. (in Chinese)
- [22] 杨亮, 王卓, 白晓平, 等. 玉米籽粒破碎率在线采样装置设计[J]. *农机化研究*, 2019, 41(6): 127–130, 135.
YANG Liang, WANG Zhuo, BAI Xiaoping, et al. Design of on-line sampling device for maize kernel broken rate [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(6): 127–130, 135. (in Chinese)
- [23] 王毅, 何宇, 王恺, 等. 巡检机器人获取柑橘树上果实完整表面信息方法研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 232–240.
WANG Yi, HE Yu, WANG Kai, et al. Method of getting complete surface information of citrus by inspection robot[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4): 232–240. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200427&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.027. (in Chinese)
- [24] LI Bing, XU De, LANG Congyan. Moment invariants for color constant image description[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2010, 19(2): 283–287.
- [25] FAZAL M, BAHARUM B. Features analysis for content-based image retrieval based on color moments[J]. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2012, 4(9): 1215–1224.
- [26] 郭彩玲, 刘刚. 基于颜色取样的苹果树枝干点云数据提取方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(10): 189–196.
GUO Cailing, LIU Gang. Point cloud extraction of apple tree canopy branch based on color sampling[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10): 189–196. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191021&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.021. (in Chinese)
- [27] 李云红, 张秋铭, 周小计, 等. 基于形态学及区域合并的分水岭图像分割算法[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(2): 190–195.
LI Yunhong, ZHANG Qiuming, ZHOU Xiaojie, et al. Watershed image segmentation algorithm based on morphology and region merging [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(2): 190–195. (in Chinese)

(上接第 118 页)

- [17] 王文明. 弹齿滚筒式捡拾装置参数分析和改进设计研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
WANG Wenming. Parameter analysis and improving design of spring-finger cylinder pick up collector[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [18] 郁志宏, 王文明, 莫日根毕力格, 等. 弹齿滚筒式捡拾器捡拾性能试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 106–112.
YU Zhihong, WANG Wenming, MORIGENBILIGE, et al. Experiment on performance of spring-finger cylinder pickup collector[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 106–112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170313&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.013. (in Chinese)
- [19] 郑智旗, 何进, 王庆杰, 等. 秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 87–96.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, WANG Qingjie, et al. Design and experiment on straw pickup-chopping and ditch-burying integrated machine[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 87–96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170711&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.011. (in Chinese)
- [20] 许涛. 弹齿式花生捡拾装置设计及试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
XU Tao. Design and experiment study on the spring-finger type of peanut pickup device[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] 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 picking methods and key components of full feeding peanut picker[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [23] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [24] 潘丽军, 陈锦权. 试验设计与数据处理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- [25] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [26] 徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社责任有限公司, 2016.