doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.015

轴流式全喂入花生收获机捡拾机构设计与试验

王伯凯[1]　顾峰玮[1]　于昭洋[1]　曹明珠[1]　王江涛[2]　胡志超[1]
(1.农业农村部南京农业机械化研究所,南京 210014;2.河南农有王农业装备科技股份有限公司,驻马店 463100)

摘要:受复杂作业环境及多目标参考系影响,花生联合收获机捡拾机构存在捡拾落果率高、荚果破损率高、功耗比率过大等问题。通过开展不同秧蔓条件下的捡拾力学特性试验,确定了捡拾机构的结构参数与工作参数。基于 Box-Benhnken 的中心组合设计理论,以机构转速、机具前进速度、弹齿间距三因素为影响因子进行响应面试验,分析各因素对捡拾落果率、荚果破损率和功耗比率的影响,并对影响因素进行优化。试验结果表明,对捡拾落果率的影响由大到小为弹齿转速、机具前进速度、弹齿间距,对荚果破损率的影响由大到小为弹齿转速、弹齿间距、机具前进速度,对功耗比率的影响由大到小为机具前进速度、弹齿转速、弹齿间距;最优参数组合为弹齿转速 63.62 r/min、弹齿间距 75.23 mm 及机具前进速度 1.07 m/s,对应的捡拾落果率为 2.15%,荚果破损率为 3.53%,捡拾功耗比率为 7.92%,比优化前分别提高了 1.0、1.2、3.4 个百分点。

关键词:花生收获机;捡拾机构;轴流式
中图分类号:S225.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)10-0132-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Picking-up Mechanism of Axial-flow Full-feed Peanut Harvester

WANG Bokai[1]　GU Fengwei[1]　YU Zhaoyang[1]　CAO Mingzhu[1]　WANG Jiangtao[2]　HU Zhichao[1]
(1. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*
2. *Henan Nongyouwang Agricultural Equipment Technology Co., Ltd., Zhumadian* 463100, *China*)

Abstract: Peanut is an important oil crop and cash crop in China. With the increasing uncertainties in international agricultural trade, efficient peanut harvesting equipment are playing a key role in maintaining the safety of China's oil trade. Influenced by complex operation environment and multi-target reference system, the picking-up mechanism of axial-flow full-feed peanut combine harvester had the problems of high dropping rate, high damage rate and high power consumption rate. The key structural parameters and operation parameters of the picking mechanism were determined by combining theoretical analysis with field experiments. The theoretical range of the main parameters of the picking-up mechanism were established. Based on Box-Benhnken's central combination theory, responsing surface tests were carried out with three factors as influencing factors, namely, mechanism rotation speed, machine advancing speed and elastic teeth spacing. The effects of various factors on picking-up and dropping rate, damage rate and power consumption rate were analyzed and the influencing factors were optimized. The significant order of dropping rate was: mechanism rotation speed, machine forward speed, and elastic teeth spacing. The significant order of pod damage rate was mechanism rotation speed, elastic teeth spacing and machine advancing speed. The significant order of influence of power consumption ratio was machine forward speed, mechanism rotation speed and elastic teeth spacing. The optimal combination of working parameters were the mechanism rotation speed of 63.62 r/min, the spacing between elastic teeth of 75.23 mm and the forward speed of the machine of 1.07 m/s, the corresponding dropping rate was 2.15%, picking-up loss rate was 3.53% and power consumption rate was 7.92%. The picking-up quality was improved and the harvesting cost was reduced. Results of the

收稿日期:2020-05-25　修回日期:2020-08-09
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)、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与自动化研究,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:nfzhongzi@163.com

research could provide a reference for the perfect design of picking-up mechanism and optimization of operation parameters of axial-flow peanut full-feed harvester. The test device was based on the picking-up mechanism of axial peanut full-feed harvester, and the test object was only "Yuhua 9327" peanut variety. It was suggested that the picking performance should be discussed in depth under the conditions of different peanut varieties and peanut harvesting equipment with different structures.

Key words: peanut harvester; picking mechanism; axial-flow

0　引言

花生是我国重要的油料作物和经济作物，随着国际农产品贸易不确定因素的增加，高效的花生收获装备将为维护中国油料贸易安全起到关键作用[1-5]。目前我国花生主产区普遍采用中小型挖掘机进行机械化收获，挖掘机将花生株系挖出，摊铺在田间晾晒，再由人工完成捡拾作业，其过程耗时耗力[6-7]。花生捡拾收获装备可对摊铺的花生秧蔓进行捡拾收获。由于花生品种及晾晒后秧蔓含水率的不同，作业时捡拾机构存在缠枝挂秧、壅堵卡滞[8-10]等现象，弹齿式捡拾机构可有效解决该问题。

国内外专家对弹齿式捡拾机构进行了很多理论和试验研究[11-17]。苏联的波波夫证明弹齿捡拾装置是连杆机构；王文明[18]对牧草弹齿滚筒捡拾机构的捡拾参数进行了仿真分析与试验研究；许涛[19]对捡拾弹齿在捡拾过程中 4 个工位的工作状态进行了理论分析；郁志宏等[20]进行了牧草弹齿捡拾器性能参数的对比试验及正交试验。目前，国内外针对弹齿式花生捡拾技术的研究较少，现有弹齿式花生捡拾机构普遍存在捡拾落果率高、荚果破损率高、功耗比率大等作业质量问题。

本文以自行研制的轴流式全喂入花生联合收获机为研究对象，针对影响弹齿式捡拾机构作业质量的瓶颈问题，结合花生摊铺晾晒农艺特点，运用理论分析与田间试验相结合的方法，确定捡拾机构的关键结构参数和作业参数，并进行捡拾作业性能试验，为明晰弹齿式捡拾机构的作业机理、优化关键部件、提高综合作业质量提供理论基础和数据支撑。

1　总体结构及捡拾机理

全喂入捡拾联合收获技术为当前国内花生高效收获领域的研究热点和产业化焦点。本文针对轴流式花生全喂入捡拾联合收获设备的作业原理及结构特点，结合捡拾物料的物理特征及生物学特性，设计弹齿滚筒式捡拾机构，并将其配置于自行研制的轴流式全喂入联合收获机上，构建自走式田间收获试验台，该试验台作业原理如图 1 所示。

1.1　花生几何参数及力学特性

该捡拾机构试验对象为摊铺晾晒后的花生株系，试验前先用小型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 2 所示，w 为作业幅宽，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"豫花 9327"为试验对象，经统计，该品种带果高度为(410 ± 20) mm，茎秆中径(8 ± 1) mm；结果区域中径为(132 ± 15) mm，结果区域高度为(122 ± 10) mm，果柄直径(1 ± 0.5) mm。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，果蔓平均含水率降至 20% 时，果柄的临界脱落力一般在 0.8 ~ 1.2 N，荚果临界破损力一般在 25 ~ 30 N。

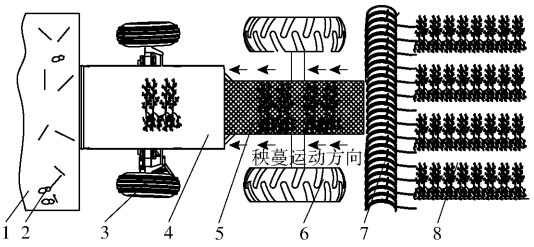


图 1　全喂入收获技术捡拾作业示意图

Fig. 1　Schematic of pickup operation of full feed harvesting technology

1. 已捡拾区域　2. 漏捡秧蔓　3. 后轮　4. 果箱　5. 输送装置　6. 前轮　7. 弹齿捡拾机构　8. 等待捡拾秧蔓

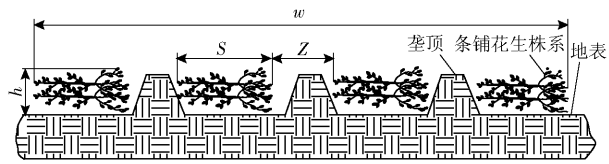


图 2　花生挖掘后摊铺晾晒示意图

Fig. 2　Schematic of spreading and drying peanuts after digging

1.2　捡拾机构总体方案

自走式试验台主要由捡拾机构、输送装置、底盘系统、提升装置、集果装置等组成(图 3)，试验台可进行捡拾机构结构参数、作业参数的优化试验。

弹齿式捡拾机构简图如图 4 所示，主要由机架、凸轮盘(有轨道)、弹齿、传动轴、弧形罩壳、轴承、法兰盘、链轮、安装基座等组成。作业时，捡拾机构随试验台以一定速度前进，滚子轴承安装在凸轮盘内转动，凸轮与机架固定。滚子轴承带动曲柄沿着凸轮轨迹带动弹齿安装杆运动，运动到最低点时，弹齿

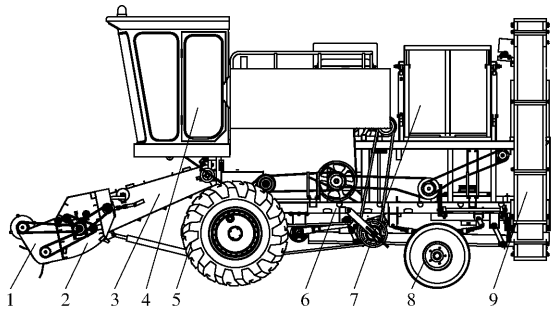


图 3 自走式试验台总体结构简图

Fig. 3 General structure diagram of self-propelled test bed

1. 捡拾机构 2. 螺旋搅拌器 3. 输送槽 4. 驾驶室 5. 驱动轮 6. 输送装置 7. 集果装置 8. 转向轮 9. 提升装置

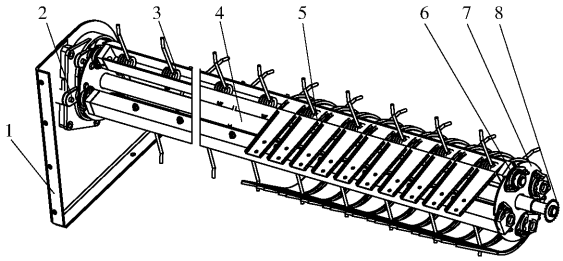


图 4 捡拾机构轴测图

Fig. 4 Axonometric drawing of picking-up mechanism

1. 机架 2. 凸轮盘 3. 弹齿 4. 传动轴 5. 弧形罩壳 6. 轴承 7. 法兰盘 8. 链轮

伸出弹齿护罩的长度最长,并以一定深度插入地表,摊铺晾晒在田间的秧蔓在捡拾弹齿挑捡作用下被从相互牵连、交织的秧蔓混合物中脱离,随弹齿上升至最高点时,秧蔓随弹齿的运动被推至最高点,随后秧蔓进入向后向下通道,弹齿伸出弹齿护罩的长度减至最小,此时秧蔓受弹齿护罩卡挡与弹齿脱离,并在惯性作用下继续往前运动,进入下一作业程序,捡拾作业过程完成。

2 关键零部件设计与运动分析

2.1 弹齿与弧形罩壳组配设计

2.1.1 捡拾状态分析

弹齿与弧形罩壳为捡拾机构关键部件,通过弹齿与弧形罩壳有效组配,可以实现秧蔓捡拾、推送。捡拾作业时,秧蔓一般会呈现全量捡拾、半量捡拾、少量捡拾 3 种作业状态(图 5),通过试验观察,铺放密度小于 28 kg/m^{2}时,捡拾机构处于全量捡拾状态,此时每排弹齿能够满载捡拾秧蔓。

如图 6 所示,在时间段 t 内,A_1弹齿理论最大捡拾区间为弹齿 A_1、弹齿 A_2及弧形罩壳之间的捡拾的花生秧蔓体积,但在实际作业中,由于机器振动、地面起伏等原因,有效捡拾空间小于理论捡拾空间。为便于分析,本文假设秧蔓铺放均匀,间隙一致,则水平横向尺寸空间满足

$$R - r \geqslant (p-1)d_1 \tag{1}$$

式中 p——每组弹齿横向铺放秧蔓株数

d_1——带果秧蔓茎秆间距,mm

R——弹齿回转半径,mm

r——弧形罩壳半径,mm

竖直层叠方向空间尺寸表达式为

$$\begin{cases} vt_0 h = \dfrac{\pi(R^2 - r^2)\lambda}{4} \\ t_0 = \dfrac{15}{n} \end{cases} \tag{2}$$

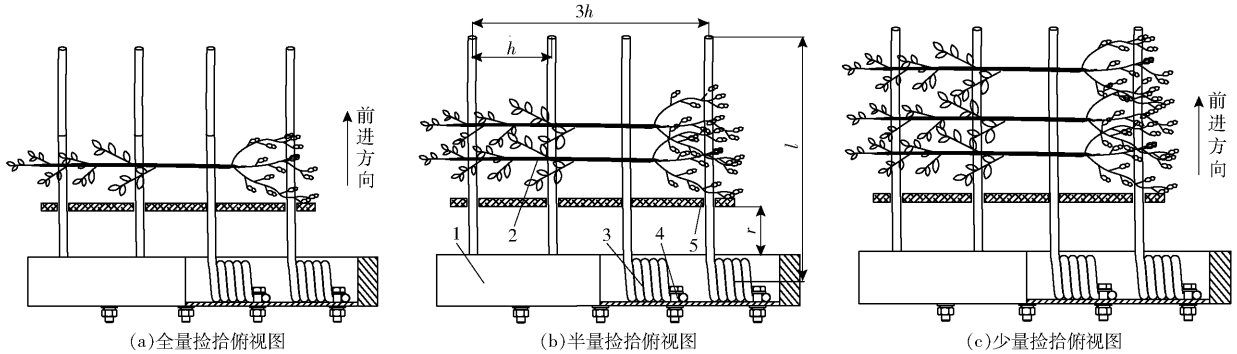
式中 v——捡拾机构前进速度,m/s

t_0——相邻弹齿时间间隔,s

n——捡拾机构转速,r/min

λ——秧蔓空隙系数

由式(1)、(2)可知,在弹齿回转半径、弧形罩壳半径、秧蔓几何尺寸及平铺厚度一定的条件下,弹齿能否顺畅有效捡拾输送带果秧蔓与弹齿回转半径、机具前进速度及弹齿转速有关,经前期机具试验及田间晾晒秧蔓统计分析,带果秧蔓平铺厚度 h 为 100 ~ 200 mm;弧形罩半径设计为 120 mm,秧蔓空隙系数 λ 在 0 ~ 1 之间,根据“豫花 9327”生物学特性,本设计取 0.65。因此确定影响捡拾输送性能的因素为机具前进速度和弹齿转速。

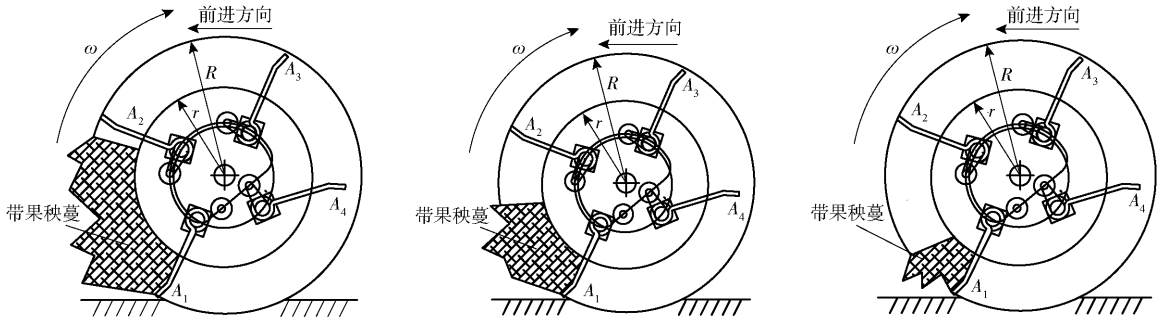


(a)全量捡拾俯视图 (b)半量捡拾俯视图 (c)少量捡拾俯视图

图 5 捡拾机构 3 种作业状态示意图

Fig. 5 Schematics of three operation states of pickup mechanism

1. 弹齿安装槽 2. 已捡秧蔓 3. 弹齿 4. 紧固螺栓 5. 弧形罩壳



(a)全量捡拾侧视图　(b)半量捡拾侧视图　(c)少量捡拾侧视图

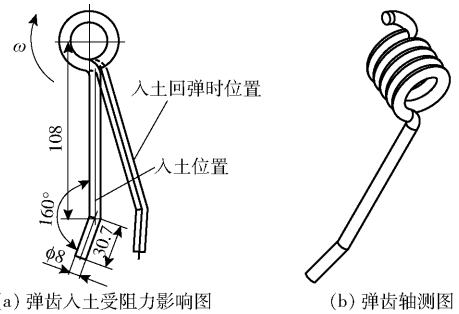
图 6　秧蔓荚果纵向层叠示意图

Fig. 6　Schematics of longitudinal stacking of vine and vine pods

2.1.2　弹齿设计

弹齿是最重要的作业部件,其性能直接影响捡拾质量[21]。弹齿作业过程中能否支撑并顺畅输运秧蔓荚果是弹齿可靠性的关键。

弹齿工作阶段分地上和地下阶段,地下阶段最为复杂,其入土瞬间会与土壤剧烈碰撞,产生剧烈振动(图 7),因此弹齿材料选用柔韧性好、抗冲击力强的碳素弹簧钢,既能减轻入土阻力、降低作业功耗,又能降低弹齿损伤,延长捡拾部件寿命,也能保证弹齿实时贴紧地面,不漏捡、少捡,提高捡拾部件自适应能力。同时,弹齿端部向旋转方向折弯,减少秧蔓荚果的滑落,降低了漏捡率,经多次试验发现,当弹齿端部的夹角为 158° ~ 165°时,捡拾效果最好,本设计取 160°。



(a) 弹齿入土受阻力影响图　(b) 弹齿轴测图

图 7　弹齿结构简图

Fig. 7　Diagrams of elastic teeth

弹齿受力如图 8 所示,工作过程中其扭矩处于最小值 T_1 和最大值 T_2 之间,扭转角处于最小值 φ_1 和最大值 φ_2 之间,当弹齿处于水平位置时,其输运弹齿组件受到带果秧蔓的扭矩最大,也是弹齿旋转过程中的一个受力最大区间位置,此时弹齿作业应满足条件为

$$k\frac{Ed_2^4\varphi_2}{3\,667Dn_1}\geqslant pmgL \tag{3}$$

式中　k——每株秧蔓需要输运的弹齿个数

E——弹性模量,Pa

d_2——弹齿直径,mm

φ_2——弹齿工作最大扭转角,(°)

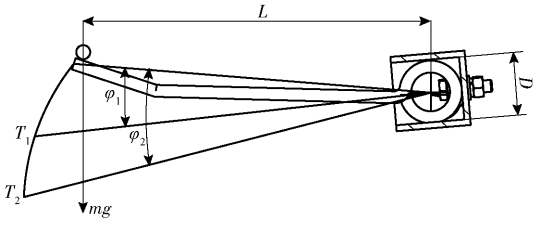


图 8　弹齿受力简图

Fig. 8　Force diagram of elastic teeth

L——弹齿回转中心到秧蔓重心的距离,mm

D——扭转弹簧中径,mm

n_1——扭转弹簧有效圈数

m——秧蔓荚果质量,kg

g——重力加速度,取 9.81 m/s^2

捡拾机构设计捡拾幅宽为四垄八行花生秧蔓,因此每排齿的个数条件[22]为

$$P_1=\frac{4S+3Z}{D_1}+1 \tag{4}$$

式中　P_1——每排弹齿个数

D_1——同一排弹齿间距,mm

由式(3)、(4)可知,在弹齿材料特性、弹簧中径一定的条件下,顺时方向能否顺畅抛送带果秧蔓与弹簧有效圈数、弹齿间距有关。根据前期试验,弹簧有效圈数一般为 4 ~ 6 圈,本设计取 4,经前期机具试验及田间晾晒秧蔓统计分析,每垄带果秧蔓的条铺宽度 S 一般在 400 ~ 500 mm 之间,秧蔓荚果平均质量在 0.8 ~ 1.2 kg 之间。因此,同样确定影响捡拾输送性能的因素为弹齿间距。

2.1.3　弹齿排列方式

合理的弹齿排列方式不仅能提高作业质量,还可使机构运转平稳,因此在设计弹齿排列方式时应尽量做到平衡[23-26]。弹齿排列主要分为周向错位排列(图 9)和周向对齐排列(图 10)2 种,错位排列展开间距是对齐排列的一半,由于晾晒田间的花生秧蔓铺放的长度方向上并不完全一致,并带有残枝断秧,错位排列可有效增加捡拾范围,提升捡拾质量。

根据设计工作幅宽(2 500 mm)和前期试验,最

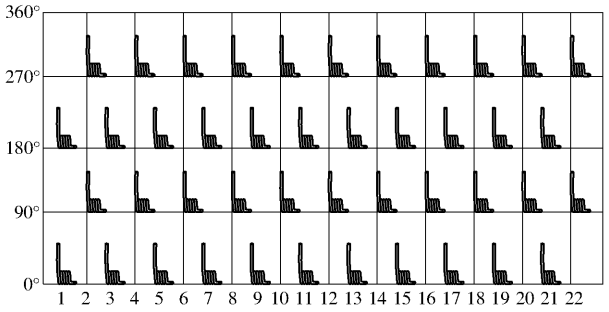


图 9 弹齿错位排列简图

Fig. 9 Sketch of dislocation arrangement of elastic teeth

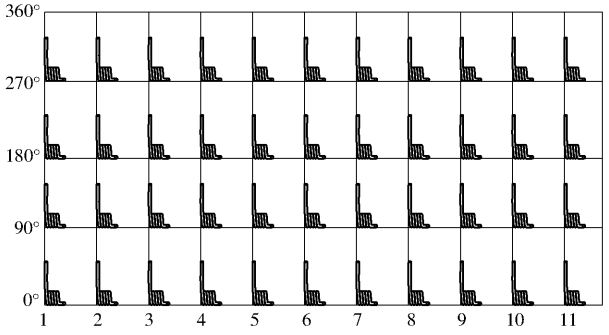


图 10 弹齿对齐排列简图

Fig. 10 Sketch of alignment and arrangement of elastic teeth

终确定每排弹齿间距范围为 160 ~ 240 mm,不同角度且相邻的每两个弹齿的轴向错位间距为同排弹齿间距的一半,试验表明,邻排弹齿未因扭变变形发生干涉,运行平稳。

2.2 捡拾机构运动分析

在进行捡拾作业时,捡拾弹齿既随试验台做直线运动,又绕传动轴做回转运动,因此捡拾机构实际运动是这两种运动的合成,以捡拾驱动轴中心为原点建立直角坐标系(图 11),x 轴为前进方向,y 轴为竖直方向,则捡拾弹齿端点的运动轨迹方程表达式为[27-29]

$$\begin{cases} v_x = v_m - R\omega\sin(\omega t) \\ v_y = R\cos(\omega t) \end{cases} \tag{5}$$

式中 v_x——弹齿端点水平方向分速度,m/s

v_y——弹齿端点垂直方向分速度,m/s

v_m——机具前进速度,m/s

ω——捡拾弹齿的回转角速度,rad/s

t——捡拾弹齿旋转时间,s

由式(5)可得端点的运动方程为

$$x = \frac{v_m}{\omega}\arcsin\frac{y}{R} + \sqrt{R^2 - y^2} \tag{6}$$

式中 x——弹齿端点水平方向位移, m

y——弹齿端点垂直方向位移, m

所以捡拾弹齿上任意点的运动方程为

$$x_i = \frac{v_m}{\omega}\arcsin\frac{y_i}{R_i} + \sqrt{R^2 - y_i^2} \tag{7}$$

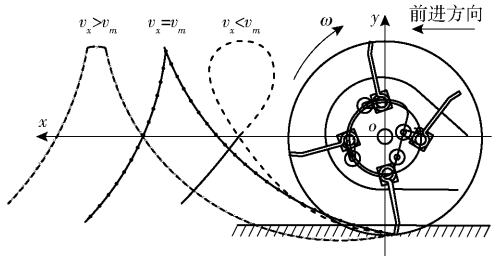


图 11 捡拾机构运动简图

Fig. 11 Motion diagram of pickup mechanism

式中 x_i——弹齿上任意点水平方向位移, m

y_i——弹齿上任意点垂直方向位移, m

则捡拾弹齿端点的绝对速度方程为

$$v = \sqrt{v_m^2 + (R\omega)^2 - 2v_m R\sin(\omega t)} \tag{8}$$

在弹齿质量一定的条件下,弹齿端点的绝对速度越大,其捡拾能力越大,效率越高,但同时对秧蔓荚果的撞击力越大,越容易造成捡拾过程中荚果落果和破损。在弹齿材料特性、弹齿回转半径一定的条件下,捡拾撞击力主要与机具前进速度和弹齿转速有关,机具前进速度参照花生半喂入收获前进速度,确定为 0.8 ~ 1.5 m/s[30],弹齿转速参照国内收获牧草和花生的同类型弹齿转速确定为 45 ~ 70 r/min[31]。

2.3 捡拾弹齿功耗分析

为包裹性捡拾地表秧蔓荚果,有效降低漏捡损失,弹齿在接触秧蔓荚果前,需插入地表以下,但会增大捡拾功耗,因此,节功降耗是弹齿设计的核心问题之一。捡拾机构功耗除了和捡拾弹齿的几何形状有关外,还与机组的速度参数有关。根据理论力学对弹齿入土过程进行受力分析,进而对其进行功耗分析。捡拾过程中作用在弹齿任意段的土壤反力包括弹齿摩擦阻力、弹齿破土阻力、弹齿与土壤间的摩擦阻力及秧蔓荚果阻力。捡拾弹齿的功耗即各阻力对弹齿所做功的总和。而各阻力与捡拾弹齿在某时刻运动的位移之积即该时刻阻力对弹齿所做的功,也是捡拾弹齿克服阻力所做的功,即捡拾机构的功耗。

如图 12 所示,设捡拾弹齿插入土壤后绕其回转中心旋转,土壤作用在微元上的法向反力方程表达式近似为

$$\mathrm{d}N = E_1 D_2 R_j \tag{9}$$

式中 $\mathrm{d}N$——弹齿任一时刻受力变化量,N

E_1——土壤坚实度,Pa

D_2——捡拾弹齿直径,mm

R_j——入土段任一角度时弹齿的深度,mm

捡拾弹齿组旋转一周在入土段总功耗的表达式为[32-34]

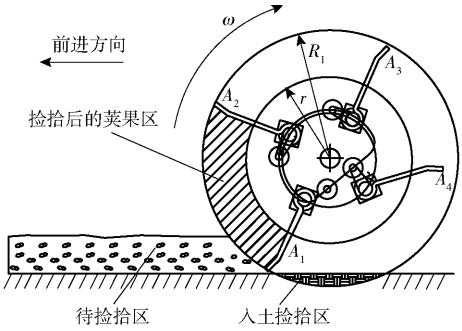


图 12　弹齿捡拾能力分析简图

Fig. 12　Analysis sketch of pickup capacity of elastic teeth

$$W_1 = 4E_1D_2\int_{t_1}^{t_2}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\sqrt{v_m^2 - 2v_mR_i\sin(\omega t) + (R_i\omega)^2}\cdot R_i\mathrm{d}\theta\mathrm{d}t + 8\mu v_m^2\rho gS(t_2 - t_1) \quad (10)$$

式中　W_1——捡拾弹齿总功耗，J

t_1——弹齿刚接触秧蔓时间，s

t_2——秧蔓离开地面时间，s

θ_1——弹齿刚接触秧蔓角度，rad

θ_2——秧蔓离开地面弹齿旋转角度，rad

ρ——条铺秧蔓平均密度，kg/m^3

μ——秧蔓与弹齿摩擦因数

由式(9)、(10)可知，在土壤坚实度、条铺秧蔓平均密度一定的条件下，捡拾弹齿功耗与弹齿-秧蔓相互作用时间及此时间内弹齿旋转角、弹齿回转半径、机具前进速度、转速有关，根据前期试验，弹齿回转半径一般为 320～520 mm，本文取 500 mm。因此确定影响捡拾功耗的因素为弹齿间距、机具前进速度及弹齿转速。

3　试验

3.1　试验条件与指标

3.1.1　试验条件

试验于 2019 年 9 月 3—10 日在河南省驻马店市遂平县试验基地进行(图 13)。试验花生品种为“豫花 9327”，单垄双行种植，垄距 800 mm，株距 280 mm，产量 4 000 kg/hm^2。试验前由挖掘机收获后铺放于田间。晾晒 3 d 后秧蔓含水率 19.27%，荚果含水率 17.32%，果柄含水率 15.97%，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。果蔓总质量均值为 10 kg/m^2，蔓果比均值为 1.2，均匀铺放密度为 25 kg/m^2(大于人工挖掘条铺量)，铺放高度 300 mm，试验地块面积 15 000 m^2(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 13.63%，土壤坚实度为 0.82 MPa，土壤容重 1.2 g/cm^3。

3.1.2　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



图 13　田间试验现场

Fig. 13　Field test site

方法按国家标准 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《花生收获机作业质量》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落果率、荚果破损率、单位捡拾功耗。

将试验区划分为 50 个测试区，每个测试区长为 100 m，捡拾幅宽 2 500 mm，进行 50 次试验，在 50 个测试区上随机取 10 测试区。捡拾机构配置于课题组自行研制的轴流式全喂入花生联合收获试验台上，保持试验台匀速行驶，捡拾机构高度保持恒定，试验员驾驶试验台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。

3.2　性能试验

3.2.1　试验设计

在前期单因素试验观察和理论分析基础上，选取对捡拾性能影响较大的弹齿转速 A、弹齿间距 B、机具前进速度 C 作为试验因素。其他试验参数为滚筒长度 2 500 mm、弹齿数量 144 和弹齿直径 5 mm，4 排弹齿周向均布。试验以捡拾落果率 Y_1、荚果破损率 Y_2 和捡拾功耗比率 Y_3 作为指标，开展三因素三水平正交试验[35-36]，试验因素与水平见表 1。

表 1　试验因素与水平

Tab. 1　Factors and levels of experiment

水平	因素		
	弹齿转速 A/(r·min^{-1})	弹齿间距 B/mm	前进速度 C/(m·s^{-1})
1	40	70	0.9
2	70	100	1.2
3	100	130	1.5

3.2.2　数据分析与处理

试验数据采用 Design-Expert 12 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。

4 试验结果与分析

根据 Box – Behnken 试验原理设计三因素三水平试验,试验方案与结果如表 2 所示。

表 2 试验设计方案及结果

Tab. 2 Experiment design and response values

序号	A/(r·min^{-1})	B/mm	C/(m·s^{-1})	捡拾落果率 Y_1/%	荚果破损率 Y_2/%	捡拾功耗比率 Y_3/%
1	40	70	0.9	0.97	1.52	8.13
2	40	100	1.2	2.46	3.38	10.92
3	40	130	0.9	0.98	2.67	9.88
4	100	130	1.2	3.74	4.91	11.47
5	70	100	1.5	4.18	4.34	13.20
6	40	130	1.2	3.28	3.72	10.29
7	70	100	1.2	4.77	4.48	11.38
8	70	100	1.2	4.21	4.46	11.45
9	100	70	1.2	7.63	5.82	12.74
10	70	70	1.5	5.17	5.53	14.80
11	70	100	1.2	3.84	4.91	13.12
12	40	100	0.9	2.33	3.94	10.42
13	100	100	0.9	5.49	5.24	12.22
14	70	130	1.5	5.87	3.68	13.78
15	70	100	1.2	4.67	4.51	11.96
16	60	70	1.2	1.23	2.52	12.06
17	100	100	1.5	4.54	5.23	15.97

4.1 回归模型建立与显著性检验

利用 Design-Expert 12 软件对表 2 中数据开展多元回归拟合分析,建立捡拾落果率 Y_1、荚果破损率 Y_2及捡拾功耗比率 Y_3对弹齿转速 A、弹齿间距 B、机具前进速度 C 3 个自变量的二次多项式响应面回归模型,建立模型为

$$Y_1 = 3.99 + 1.13A - 0.422\,5B + 1.67C - 1.11AB - 0.45AC - 0.43BC + 0.42A^2 - 0.82B^2 - 0.53C^2 \tag{11}$$

$$Y_2 = 18.19 + 2.61A - 0.612B + 1.97C - 2.31AB - 0.41AC - 0.73BC + 0.78A^2 - 0.93B^2 - 0.69C^2 \tag{12}$$

$$Y_3 = 95.39 - 0.76A + 0.36B - 53.39C + 0.000\,14AB - 0.18AC - 0.07BC + 0.001\,4A^2 - 0.001\,5B^2 + 14C^2 \tag{13}$$

由表 3 可知,捡拾落果率 Y_1、荚果破损率 Y_2的 P 值分别为 0.075 4、0.091 0(均大于 0.05),表明 2 个模型影响显著,单位捡拾功耗比率 Y_3的 P 值为 0.009 5(小于 0.01),表示影响极显著。其失拟项的 P 值分别为 0.095 2、0.053 6、0.083 6(均大于 0.05),表明 3 个模型在试验参数范围内拟合程度较高;其决定系数 R^2分别为 0.932 9、0.983 2、0.947 8,表明 93% 以上的响应值均可以由这 3 个模型解释。表明该模型可以预测捡拾机构工作参数。

表 3 回归方程方差分析

Tab. 3 Variance analysis of regression equation

方差来源	捡拾落果率 Y_1				荚果破损率 Y_2				捡拾功耗比率 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	48.43	12	4.64	0.075 4	39.86	9	2.84	0.091 0	113.38	9	6.84	0.009 5
A	5.11	1	5.87	0.072 6	14.26	1	9.16	0.019 2	17.29	1	9.38	0.018 3
B	0.71	1	0.82	0.416 4	3.66	1	2.35	0.169 1	0.67	1	0.36	0.566 4
C	11.19	1	12.85	0.023 1	5.14	1	3.30	0.112 2	62.89	1	34.12	0.000 6
AB	4.93	1	5.66	0.076 1	6.53	1	4.19	0.079 8	0.06	1	0.03	0.859 1
AC	0.81	1	0.93	0.389 4	0.49	1	0.32	0.589 7	9.92	1	5.38	0.053 4
BC	0.73	1	0.83	0.411 3	6.25	1	4.01	0.085 2	1.92	1	1.04	0.341 6
A^2	0.75	1	0.85	0.406 7	3.16	1	2.03	0.197 4	6.64	1	3.60	0.099 5
B^2	2.81	1	3.22	0.147 1	0.21	1	0.13	0.726 4	8.04	1	4.36	0.075 1
C^2	1.17	1	1.34	0.311 6	0.32	1	0.21	0.663 1	6.72	1	3.65	0.097 8
残差	13.74	11			14.43	10			12.90	7		
失拟	10.26	7	5.78	0.095 2	13.12	6	2.84	0.053 6	10.06	3	4.73	0.083 6
误差	3.48	4			1.31	4			2.84	4		
总和	51.91	13			50.76	16			126.28	16		

同时,捡拾落果率 Y_1响应面模型中的 A、C 对模型影响显著;荚果破损率 Y_2响应面模型中 A 对模型影响显著;单位捡拾功耗比率 Y_3响应面模型中的 C 对模型影响极显著,A 对模型影响显著,在保证模型 $P<0.01$、失拟项 $P>0.05$ 的基础上,剔除对模型影响不显著的其他回归项,优化模型为

$$Y_1 = 5.92 + 1.32A + 3.52C - 1.11AB - 0.68AC + 0.68A^2 - 0.45C^2 \tag{14}$$

$$Y_2 = 32.56 + 4.94A + 1.97C - 2.35AB - 0.73BC - 0.93B^2 - 0.69C^2 \tag{15}$$

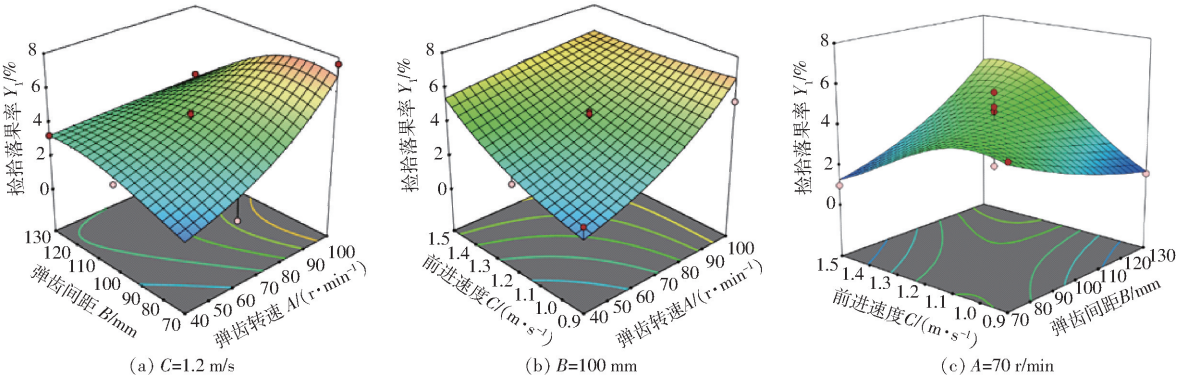
$$Y_3 = 107.45 - 6.46A - 78.29C - 1.25AC + 14.04C^2 \tag{16}$$

4.2　交互因素对性能的影响

根据表 3 试验结果，可得弹齿转速 A、弹齿间距 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 12 软件绘制响应面图。

4.2.1　交互因素对捡拾落果率的影响

交互因素对拾落果率 Y_1 影响响应曲面如图 14 所示。从图 14a 可以看出，减小弹齿转速 A 和增大弹齿间距 B 有助于降低捡拾落果率；从图 14b 可以看出，减小弹齿转速 A 与机具前进速度 C 明显有助于降低捡拾落果率；从图 14c 可以看出，减小机具前进速度 C 和弹齿间距 B 有助于降低捡拾落果率。



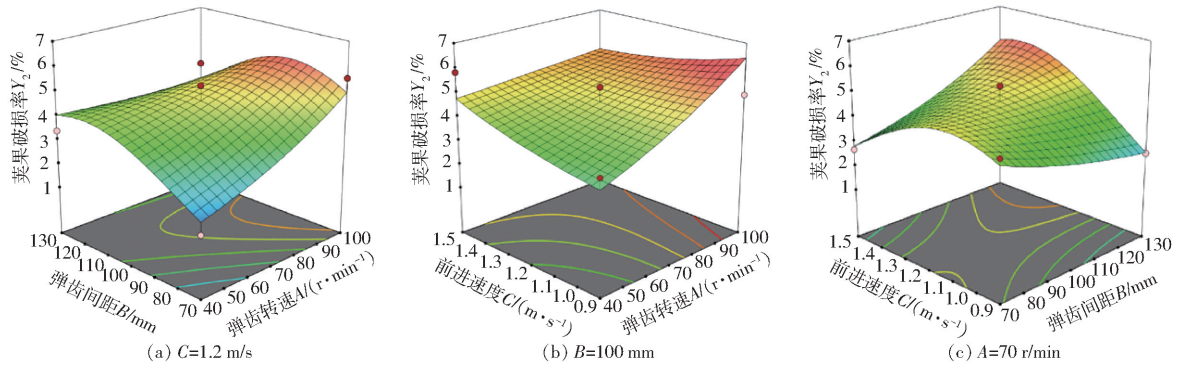
(a) C=1.2 m/s　(b) B=100 mm　(c) A=70 r/min

图 14　交互因素影响捡拾落果率的响应曲面

Fig. 14　Influence of interactive factors on picking and falling fruit rate

4.2.2　交互因素对荚果破损率的影响

交互因素对荚果破损率 Y_2 影响响应曲面如图 15 所示。从图 15a 可以看出，减小弹齿转速 A 和弹齿间距 B 有助于降低荚果破损率，从图 15b 可以看出，减小弹齿转速 A 与机具前进速度 C 明显有助于降低荚果破损率；从图 15c 可以看出，减小机具前进速度 C 和增大弹齿间距 B 有助于降低荚果破损率。



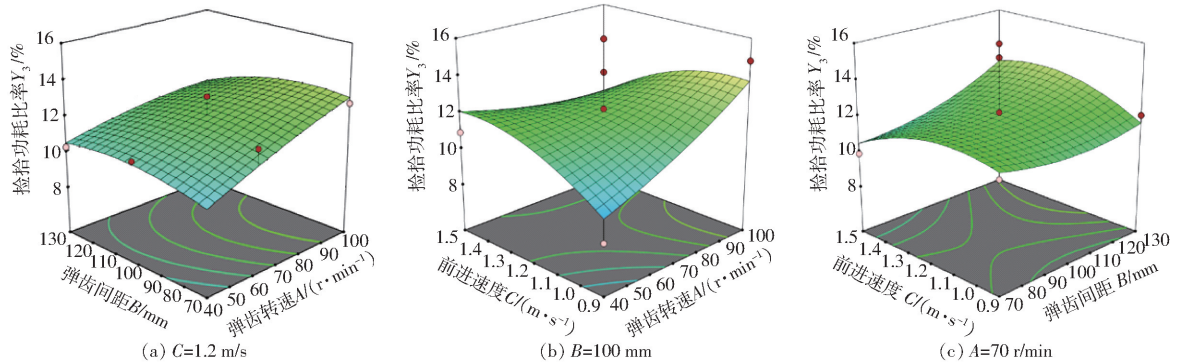
(a) C=1.2 m/s　(b) B=100 mm　(c) A=70 r/min

图 15　交互因素影响荚果破损率的响应曲面

Fig. 15　Influence of interactive factors on picking-up loss rate

4.2.3　交互因素对捡拾功耗比率的影响

交互因素对捡拾功耗比率影响响应曲面如图 16 所示。从图 16a 可以看出，减小弹齿转速 A 和增大弹齿间距 B 有助于降低捡拾功耗比率 Y_3；从图 16b 可以看出，减小弹齿转速 A 与机具前进速度 C 明显有助于降低捡拾功耗比率 Y_3；从图 16c 可以



(a) C=1.2 m/s　(b) B=100 mm　(c) A=70 r/min

图 16　交互因素影响捡拾功耗比率的响应曲面

Fig. 16　Influence of interactive factors on power consumption

看出,减小机具前进速度 C 和增大弹齿间距 B 有助于降低捡拾功耗比率 Y_3。

4.3 捡拾机构参数优化

根据捡拾落果率 Y_1、荚果破损率 Y_2及捡拾功耗比率 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。以最小捡拾落果率 Y_1、荚果破损率 Y_2及最低捡拾功耗比率 Y_3为评价指标,建立优化数学模型:目标函数 $\min Y_1(A,B,C)$,$\min Y_2(A,B,C)$,$\min Y_3(A,B,C)$;约束条件 40 r/min $\leqslant A \leqslant$ 100 r/min,70 mm $\leqslant B \leqslant$ 130 mm,0.9 m/s $\leqslant C \leqslant$ 1.5 m/s。利用 Design-Expert 12 软件自带的约束条件优化求解模块,可求得满足约束条件的最小捡拾落果率 Y_1、荚果破损率 Y_2及最低捡拾功耗比率 Y_3最优参数组合。求解的最优参数组合:弹齿转速 63.62 r/min、弹齿间距 75.23 mm 及机具前进速度 1.07 m/s,对应的捡拾落果率 Y_1、荚果破损率 Y_2及捡拾功耗比率 Y_3分别为 2.15%、3.53%和 7.92%。

捡拾机构实际工作参数很难调整到理论求解的优化值,根据自走式试验台捡拾机构参数可调范围,选择一组接近优化求解值的参数进行田间试验,参数值为:弹齿转速 63 r/min、弹齿间距 75 mm 及机具前进速度 1 m/s。于 2019 年 10 月 8 日在相同地点采用相同的测试方法进行试验,捡拾落果率 Y_1、荚果破损率 Y_2及捡拾功耗比率 Y_3平均值分别为 2.2%、3.6%和 8.1%。与该型钉齿滚筒式花生捡拾收获机常用的一组捡拾机构参数收获同等条件下的条铺晾晒花生时对比,捡拾落果率降低了 32%,荚果破损率 Y_2降低了 25%,捡拾功耗比率降低了 30%。单因素和双因素效应分析表明,弹齿间距在中心水平附近对损失率影响较小,降低弹齿间距可显著降低荚果破损率,降低弹齿转速可显著降低捡拾落果率、荚果破损率,实际田间试验与理论分析一致,表明求解的捡拾落果率、荚果损失率及捡拾功耗比率回归模型的精度能满足参数优化的需要。

5 结论

(1)设计了一种适用于轴流式花生全喂入收获机的弹齿捡拾机构,一次下田即可对挖掘后成条铺放的花生完成捡拾。与常规捡拾机构相比,捡拾损失小、落果率低,经济性好。

(2)基于 Box - Benhnken 中心组合设计理论,以机构转速、机具前进速度、弹齿间距三因素为影响因子进行响应面试验,分析各因素对捡拾落果率、荚果破损率和功耗比率的影响,并对影响因素进行优化。结果表明,对捡拾落果率的影响由大到小为弹齿转速、机具前进速度、弹齿间距,对荚果破损率的影响由大到小为弹齿转速、弹齿间距、机具前进速度,对功耗比率影响由大到小为机具前进速度、弹齿转速、弹齿间距;最优参数组合为弹齿转速 63.62 r/min、弹齿间距 75.23 mm 及机具前进速度 1.07 m/s,对应的捡拾落果率为 2.15%、荚果破损率为 3.53%及捡拾功耗比率为 7.92%。所设计的捡拾机构提高了捡拾质量,降低了收获成本。

参 考 文 献

[1] 刘娟,汤丰收,张俊,等. 国内花生生产技术现状及发展趋势研究[J]. 中国农学通报,2017,33(22):13 - 18.
LIU Juan, TANG Fengshou, ZHANG Jun, et al. Current status and development trends of peanut production technology in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2017,33(22):13 - 18. (in Chinese)

[2] 王伯凯,吴努,胡志超,等. 国内外花生收获机械发展历程与发展思路[J]. 中国农机化,2011(4):6 - 9.
WANG Bokai, WU Nu, HU Zhichao, et al. Experience and thought of development of peanut harvesting mechanization at home and abroad [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011(4): 6 - 9. (in Chinese)

[3] 高连兴,陈中玉,CHARLES Chen,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, CHARLES Chen, 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)

[4] 吕小莲,王海鸥,张会娟,等. 国内花生机械化收获的现状与研究[J]. 农机化研究,2012,34(6):245 - 248.
LÜ Xiaolian, WANG Haiou, ZHANG Huijuan, et al. Research and situation on peanut machinery harvesting in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(6): 245 - 248. (in Chinese)

[5] 尚书旗,刘曙光,王方艳,等. 花生生产机械的研究现状与进展分析[J]. 农业机械学报,2005,36(3):143 - 147.
SHANG Shuqi, LIU Shuguang, WANG Fangyan, et al. Current Situation and development of peanut production machinery[J] Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 143 - 147. (in Chinese)

[6] 胡志超,彭宝良,尹文庆,等. 4LH2 型半喂入自走式花生联合收获机的研制[J]. 农业工程学报,2008,24(3):148 - 153.
HU Zhichao, PENG Baoliang, YIN Wenqing, et al. Design of 4LH2 type half-feed and self-propelled peanut combine[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 148 - 153. (in Chinese)

[7] 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 fruit-picking [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(11): 27 - 36. (in Chinese)

[8] 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)

[9] ANTIAOBONG E A, BHATTARAI 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.
[10] 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)
[11] 杨松梅,颜利民,莫毅松,等. 随动式残膜回收机捡拾装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(12):109 - 115.
YANG Songmei, YAN Limin, MO Yisong, et al. Design and experiment on collecting device for profile modeling residual plastic film collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 109 - 115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20181213&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.013. (in Chinese)
[12] 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)
[13] 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)
[14] BAI Xuewe, ZHAO Ping, LI Yongkui, et al. Model a nalysis 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.
[15] 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-tooth 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 = 1. DOI: 10.6041/jissn.1000-1298.2013.S1.018. (in Chinese)
[16] 赵岩,郑炫,陈学庚,等. CMJY - 1500 型农田残膜捡拾打包联合作业机设计与试验[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)
[17] 康建明,彭强吉,王士国,等. 弹齿式残膜回收机捡拾装置改进设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):295 - 303.
KANG Jianming, PENG Qiangji, WANG Shiguo, et al. Improved design and experiment on pickup unit of spring-tooth residual plastic film collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 295 - 303. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2018s039&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.039. (in Chinese)
[18] 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)
[19] 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)
[20] 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)
[21] 尹建军,刘丹萍,李耀明. 方捆机捡拾器高度自动仿形装置的参数分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(8):86 - 92.
YIN Jianjun, LIU Danping, LI Yaoming, Design and parameters analyses of automatic height profiling device of quadrate-bale baler pickup[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 86 - 92. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20140814&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.014. (in Chinese)
[22] 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)
[23] 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 = 1. DOI: 10.6041/jissn.1000-1298.2016.S0.022. (in Chinese)
[24] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
[25] 曹阳. 一种秸秆粉碎刀的布刀方法[J]. 现代化农业,2014(6): 49 - 50.
[26] 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)

(下转第 169 页)

Northeast Agricultural University,2017. (in Chinese)
[21] MING Xianglan, CHEN Haitao. Optimization of technological parameters for preparation of vegetable fiber mulch film with waste corrugated paperboard[J]. Journal of Materials and Applications, 2018, 7(2): 66 - 75.
[22] MING Xianglan, CHEN Haitao, WANG Donghai. Optimization of processing parameters to increase thermal conductivity of rice straw fiber film[J]. Applied Sciences, 2019, 11(1): 1 - 12.
[23] 沈新元. 高分子材料加工原理[M]. 北京:中国纺织出版社,2000.
[24] 朱复华. 挤出理论及应用[M]. 北京:中国轻工业出版社,2001.
[25] 陈海涛,苗乃彪,董冰哲,等. D200 型秸秆纤维制取机结构优化试验研究[J]. 东北农业大学学报,2015,46(7):90 - 94.
CHEN Haitao, MIAO Naibiao, DONG Bingzhe, et al. Structural optimization experimental study on D200 crop straw fiber extruder[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 46(7): 90 - 94. (in Chinese)
[26] 陈海涛,明向兰,刘爽,等. 废旧棉与水稻秸秆纤维混合地膜制造工艺参数优化[J]. 农业工程学报,2015,31(13):292 - 300.
CHEN Haitao, MING Xianglan, LIU Shuang, et al. Optimization of technical parameters for making mulch from waste cotton and rice straw fiber[J]. Transactions of the CASE,2015,31(13):292 - 300. (in Chinese)
[27] 王骞,何珂,金诚谦,等. 玉米激振摘穗机理分析与参数试验优化[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):249 - 257.
WANG Qian, HE Ke, JIN Chengqian, et al. Mechanism analysis and experiment optimization on parameters of maize exciting and picking[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 249 - 257. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2018s033&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.033. (in Chinese)
[28] 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京:科学出版社,2009.

(上接第 141 页)

[27] 张学军,吴成武,王伟,等. 齿形刮板式残膜与残茬输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(9):49 - 51.
ZHANG Xuejun, WU Chengwu, WANG Wei, et al. Design and experiment on the zigzag scraper transportation device for remnant plastic film and stubble[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 49 - 51. (in Chinese)
[28] 薛文瑾,王春耀,朱振中,等. 卷膜式棉花苗期残膜回收机的设计[J]. 农业机械学报,2005,36(3):148 - 149, 147.
XUE Wenjin, WANG Chunyao, ZHU Zhenzhong, et al. Design of rolling-film residue collector for cotton seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 148 - 149, 147. (in Chinese)
[29] 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)
[30] 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.
[31] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
[32] 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert SPSS 应用[M]. 北京:科学出版社,2016.
[33] 杨丽,张东兴,侯书林,等. 玉米苗期地膜回收机结构参数分析与试验[J]. 农业机械学报,2010, 41(12):29 - 34.
YANG Li,ZHANG Dongxing,HOU Shulin, et al. Analysis of structural parameters and experiment of plastic film collector for corn fields during seedling period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12):29 - 34. (in Chinese)
[34] 郁志宏,莫日根毕力格,王文明,等. 弹齿滚筒式牧草捡拾器性能参数对比试验研究[J]. 农机化研究,2017,39(2):122 - 127.
YU Zhihong, Morigenbilige, WANG Wenming, et al. Comparison experimental and research on the performance parameter of the spring-finger cylinder pickup collector[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2): 122 - 127. (in Chinese)
[35] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):1 - 19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conser vation tillage technology and machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(4):1 - 19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180401&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)
[36] 雷小龙,杨文浩,杨龙君,等. 油菜精量穴播集中排种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(2):54 - 64.
LEI Xiaolong, YANG Wenhao, YANG Longjun, et al. Design and experiment of seed hill-seeding centralized metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(2):54 - 64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2002007&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.007. (in Chinese)