

鲜食大豆收获机弹齿滚筒式采摘装置设计与试验

刘志远^{1,2} 金诚谦¹ 袁文胜¹ 冯玉岗¹ 袁建明²

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 武汉理工大学交通与物流工程学院, 武汉 430063)

摘要:针对鲜食大豆采收劳动强度大,人工采摘效率低,缺少相应收获机械装备等问题,结合鲜食大豆种植模式和采摘期植株物理特性,设计了一种弹齿滚筒式鲜食大豆采摘装置。阐述了弹齿滚筒采摘装置的工作原理,对采摘过程中的豆荚进行运动学分析,并对装置关键部件进行了参数设计和结构优化,确定了影响作业效果的因素。通过单因素预试验确定了关键参数的范围,以前进速度、滚筒转速、割台高度为试验因素,以掉落率、挂枝率、破损率为试验指标进行三因素五水平二次正交旋转中心组合试验,建立了试验因素与试验指标间的数学模型,并分析了各因素对试验指标的影响。对模型进行粒子群算法优化,预测最优参数组合为:前进速度 0.43 m/s、滚筒转速 245 r/min、割台高度 4 cm,对应的掉落率、挂枝率和破损率的预测值分别为 10.6%、4.4%、5.6%。对最优参数组合进行田间验证试验,结果为掉落率 11.8%,挂枝率 4.0%,破损率 6.1%,试验结果与理论预测值的相对误差均不高于 10.1%。方差分析表明各评价指标的实际值和预测值之间不具有显著性差异。研究结果可为鲜食大豆采摘装置设计提供参考。

关键词:鲜食大豆; 采摘装置; 弹齿滚筒; 参数优化; 响应面试验

中图分类号: S225.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)12-0171-10 **OSID:** 

Design Optimization and Experiment of Spring-tooth Drum Type Picking Device for Vegetable Soybean Harvester

LIU Zhiyuan^{1,2} JIN Chengqian¹ YUAN Wensheng¹ FENG Yugang¹ YUAN Jianming²

(1. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China*
2. *School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China*)

Abstract: To solve the problems of high labor intensity, low efficiency of manual picking, and lack of corresponding harvesting machinery and equipment for vegetable soybean harvesting, a spring-tooth drum type vegetable soybean picking device was designed in combination with the physical characteristics of vegetable soybean plants and the planting mode. The working principle of the spring-tooth drum picking device was expounded, the parameter design and structure optimization of the key components of the device were carried out, the kinematic of the pod was analyzed, and the factors affecting the operation effect were determined. The range of key parameters was determined and narrowed by a single factor test. Taking forward speed, drum rotation speed, and header height as test factors, and using drop rate, hanging rate, and breakage rate as experimental indicators, a three-factor and five-level second orthogonal rotation center combination test was carried out. The mathematical model between the experimental factors and the experimental indicators was established and the influence of each factor on the experimental indicators was analyzed. The model was optimized by particle swarm optimization, and the predicted optimal parameter combination was as follows: forward speed was 0.43 m/s, drum rotation speed was 245 r/min, header height was 4 cm, and the corresponding predicted values of drop rate, hanging rate, and breakage rate were 10.6%, 4.4%, and 5.6%, respectively. The field verification test was carried out on the optimal parameter combination, and the results showed that the drop rate of the field test was 11.8%, the hanging rate was 4.0%, and the damage rate was 6.1%. The relative errors were no more than 10.1%. The variance analysis showed that there was no significant difference between

收稿日期: 2022-03-06 修回日期: 2022-09-20
基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04)和中国农业科学院创新工程项目
作者简介: 刘志远(1996—),男,助理工程师,武汉理工大学博士生,主要从事农作物收获机械化研究,E-mail: lzy_caas@foxmail.com
通信作者: 袁文胜(1978—),男,副研究员,主要从事农作物生产机械化研究,E-mail: ywensheng@qq.com

the actual value and the prediction of the evaluation index. The research results can provide a reference for the further structural design and parameter optimization of the spring-tooth drum vegetable soybean picking device.

Key words: vegetable soybeans; picking devices; spring-tooth drum; parameter optimization; response surface test

0 引言

鲜食大豆俗称毛豆,也称青大豆,是种子在鼓粒盛期至初熟期作为一种蔬菜来采摘的大豆类型。20世纪80年代以来,国内外市场对鲜食大豆的需求量不断增加,从事鲜食大豆相关生产的产业增多,依靠传统手工采摘豆荚这种方式成本高,效率低,严重制约着国内鲜食大豆产业的发展^[1]。因此,研发鲜食大豆收获机械装备,应用推广高效率、高质量机械化收获方式具有十分重要的意义。

鲜食大豆的收获主要是采摘收集豆荚,收获形式主要分为割后场上脱荚和田间直接脱荚等。在土地条件较差或种植模式不适合机器田间作业的地区,需要收割植株后再集中进行脱荚。因此,鲜食大豆场上脱荚机具得到研发和应用。场上脱荚机主要是由电机提供动力,脱荚机构将豆荚和豆叶一起从植株上脱下,再进行筛选获取干净豆荚。秦广明等^[2]设计了5TD60型青大豆脱荚机,采用双对辊脱荚机构,与送料方向呈45°和70°夹角的两对脱荚辊分次脱荚。王福义^[3]设计了5MDZJ-380-1400型鲜食大豆摘荚机器,带有橡胶指的滚筒与夹持机构呈一定角度,实现由滚筒上胶指从株顶到根部梳脱豆荚的功能。场上脱荚机需要人工单株喂料,效率较低,且前期收割运输费时费力,在提高鲜食大豆收获效率方面作用有限。

与其它荚果类作物收获机械发展相似^[4-5],效率更高的田间联合收获方式逐渐得到了重视和发展。荚果类作物联合收获采摘机构通常可分为卧式滚筒机构^[6-8]和立式对辊机构^[9-11],立式对辊机构为对行作业,植株从辊间隙通过,在脱荚辊高速旋转击打和螺旋摘捋作用下分离荚果和茎秆。赵映等^[12]对立式辊脱荚装置构建了荚-柄分离力学模型,确定了脱荚转速、喂料速度和对辊间距为影响脱荚率和破损率的主要因素,并得出了因素最优参数组合。金月等^[13]对脱荚辊倾斜角度和类型做了试验测试,结果表明最佳辊型为螺旋式,倾斜角度为30°。大豆常采用起垄种植模式,使用不同种植和田间管理机械会造成行距不一致^[14-16],而立式对辊结构受制于种植间距不一,很难有效同时多行采摘。于是兼具高效率和高适应性的卧式滚筒机构得到了

更多的研究。MBUVI等^[17]和ZANDONAD等^[18]分别采用不同型号的滚筒式豌豆联合收获机进行鲜食大豆收获,损失率最高达到45%,对鲜食大豆作业效果不理想。于是对鲜食大豆联合收获专用采摘装置进行研究。张凯等^[19]设计了一种梳齿滚筒式采摘装置虚拟样机,对其运动轨迹做出了模拟。王显峰^[20]对自走式鲜食大豆摘荚机进行了整体初步设计,采摘装置采用弹齿滚筒形式,并对弹齿排数和滚筒直径取值进行了初步分析,但其结构设计缺少理论依据,主要参数未得到试验验证。涂福泉等^[21]设计了双弹指采摘装置,固定弹指和受偏心轮槽作用的伸缩弹指相互配合,用来模拟人工慢速采摘豆荚,但仍停留在虚拟样机阶段,实际作业效果未得到有效验证。

综上所述,目前国内针对鲜食大豆联合收获专用采摘装置的研究大多停留在设计研发阶段,所设计机构仍为虚拟样机,其结构合理性及作业效果未得到有效的验证。本文根据鲜食大豆种植模式和物理特性设计了弹齿滚筒式采摘机构,对采摘装置具体结构进行优化改进,并通过实际试验优化装置工作参数,验证弹齿滚筒采摘装置作业效果。以期弹齿滚筒式鲜食大豆收获装备的设计和 optimization 提供参考。

1 鲜食大豆植株物理特性参数

国内鲜食大豆种植区域主要分布在江苏、浙江、福建、东北、海南等地区^[22]。选取测试的品种为浙江省慈溪市种植的“浙鲜86”,生育期75 d,采用起垄种植,于2020年7月7日选取长势一致良好的田块,采用五点法取样,每个取样点15株鲜食大豆植株。利用卷尺(量程2 m,精度1 mm)、数显游标卡尺(量程200 mm,精度0.01 mm)、UTM6503型电子材料万能试验机(传感器规格为5 kN,位移分辨率为0.01 mm,加载速率为0.01~500 mm/min)等仪器进行生长特性和物理特性测量(图1),得到参数如表1所示。荚-柄分离力为14.3 N,标准差为3.8 N,变异系数为26.6%。

2 采摘装置结构设计

2.1 采摘装置总体结构和作业原理

采摘机构是鲜食大豆联合收获机的核心装置,



图 1 植株物理特性测量

Fig.1 Measurement of plant physical properties

表 1 鲜食大豆植株物理特性参数

Tab.1 Vegetable soybean plants physical characteristics

parameters			
参数	均值/cm	标准差/cm	变异系数/%
行距	47.6	6.3	13.2
株距	26.4	4.8	18.2
植株高度	45.3	9.6	21.2
结荚区域长度	28.2	3.3	12.5
结荚区域宽度	8.5	1.2	14.1
荚果长度	5.42	0.72	13.3
荚果宽度	1.42	0.11	7.7
底荚高度	10.5	2.7	25.7

工作原理通常是用齿形梳刷的机构将豆荚从植株上分离。生产应用中,具有相似功能的梳刷齿形按结构不同主要有梳齿滚筒、钉齿滚筒和弹齿滚筒等几种。对比几种结构分别收获洋甘菊、野生蓝莓、辣椒等作物的效果,梳齿容易造成植物堵塞齿隙影响收获,钉齿则容易损伤果荚,因此鲜食大豆收获采用弹齿滚筒结构来减少堵塞和损伤^[23-27]。弹齿滚筒式采摘机构总体由液压机构、分禾机构、弹齿滚筒、罩壳、地辊等部分构成,其结构如图 2 所示。

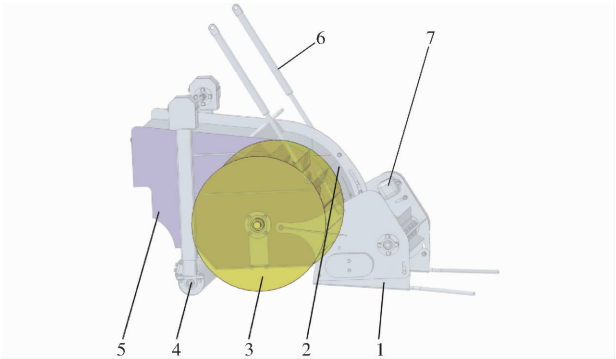


图 2 弹齿滚筒式鲜食大豆收获机采摘机构结构简图

Fig.2 Structure diagram of picking mechanism of spring-tooth drum vegetable soybean harvester

1. 分禾机构 2. 上盖板 3. 弹齿滚筒 4. 地辊 5. 侧挡板
6、7. 液压装置

工作原理如图 3 所示,作业时机具向右前进,滚筒逆时针旋转。滚筒上的弹齿对豆荚产生由下向上

的击打作用力,使豆荚产生瞬时加速,冲击力克服豆荚和茎秆之间的结合力,使豆荚从植株上分离。整个采收过程弹齿滚筒功能区分为 4 部分:① $a \sim b$ 为接触击打区域,弹齿和豆荚接触,通过击打梳脱使豆荚和茎秆分开。② $b \sim c$ 为携带输送区域,脱落的豆荚依靠惯性进入滚筒上半部,在上盖板滚筒之间,豆荚被携带到采摘台后方。③ $c \sim d$ 为卸料抛送区域,豆荚逐渐和弹齿分离,抛送到后下方输送带上。④ $d \sim a$ 为空回区域,弹齿基本不与豆荚接触。梳脱后的植株主茎秆仍留在地上,叶片、豆荚、分枝则被滚筒携带抛送到后方传送带上,进入后续清选收集工作。

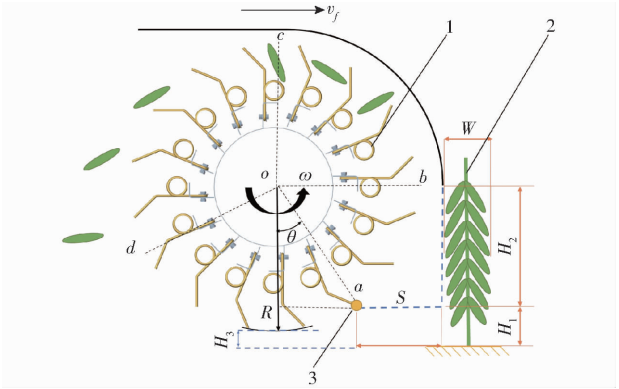


图 3 鲜食大豆弹齿滚筒采摘机构作业原理图

Fig.3 Schematic of picking pods by spring-tooth drum mechanism

1. 弹齿滚筒 2. 鲜食大豆植株 3. 弹齿-底荚接触点

2.2 弹齿滚筒参数设计及影响因素确定

2.2.1 弹齿滚筒参数设计

2.2.1.1 滚筒半径

鲜食大豆豆荚主要分布在植株中间,为确保采摘区域能够覆盖所有结荚区域,滚筒上弹齿端点到轴心的半径(简称滚筒半径 R)应适应植株物理特性。滚筒半径由结荚区域高度、底荚高度、弹齿和底荚接触位置、滚筒距地高度等决定,为了击脱后的豆荚不被弹出滚筒,能够依靠惯性进入上部的携带输送区域,弹齿和底荚的接触点应在和弹齿最低点呈角度 θ 的点 a (图 3)处,弹齿最低点应低于底荚高度。且为避免发生铲土现象,弹齿最低点与地面之间需要留有一定距离,满足

$$\cos\theta \geq \frac{R - H_1}{R} \tag{1}$$

式中 H_1 ——底荚高度,mm

为使滚筒半径能够覆盖整个结荚区域,需要满足

$$R \cos\theta \geq H_2 \tag{2}$$

式中 H_2 ——结荚范围高度,mm

整理可得滚筒半径 R 的取值范围为

$$\frac{H_2}{\cos\theta} \leq R \leq \frac{H_1}{1 - \cos\theta} \tag{3}$$

此时,弹齿最低点距离地面高度为

$$H_3 = H_1 - (R - R\cos\theta) \tag{4}$$

式中 H_3 ——弹齿最低点距地高度,mm

根据表 1 中所测量统计的物理参数,鲜食大豆植株结荚范围长度 H_2 定为 28 cm,底荚高度 H_1 定为 10 cm。根据式 (3) 可以计算出角度 θ 需要小于 42° 。根据式 (4) 可知,当滚筒半径一定时, θ 越大则距地高度越小,因此 θ 不宜过大,此处 θ 取 30° 。滚筒半径 R 的取值范围为 32.3 ~ 75.2 cm。当 θ 为 30° ,距地高度 5 cm,综合考虑整体结构尺寸,选取滚筒半径 R 为 40 cm。

2.2.1.2 弹齿结构

如图 4 所示,滚筒上沿圆周均匀分布 N 排弹齿,弹齿由螺栓连接在固定梁上。弹齿可视为悬臂梁结构,如图 5 所示。

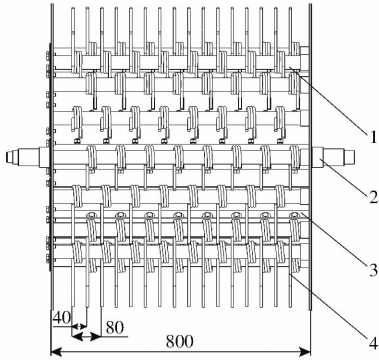


图 4 滚筒结构和弹齿布局

Fig. 4 Drum construction and spring tooth arrangement

1. 弹齿约束轴 2. 滚筒轴 3. 弹齿梁 4. 弹齿

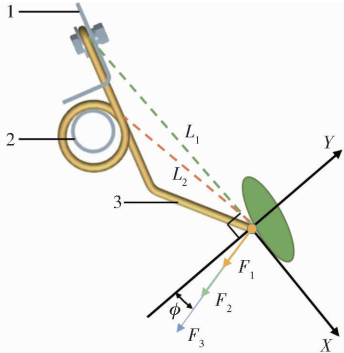


图 5 弹齿受力分析

Fig. 5 Force analysis of spring teeth

1. 弹齿梁 2. 弹齿约束轴 3. 弹齿

受外部周期冲击载荷,正常工作时总冲击载荷 F 可表示为

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \tag{5}$$

式中 F_1 ——弹齿和植株摩擦力,N

F_2 ——叶片茎秆阻力,N

F_3 ——弹齿和豆荚碰撞力,N

弹齿所受弯矩 M 可表示为

$$M = L_1 F \cos\phi \tag{6}$$

式中 L_1 ——弹齿端点到根部的力臂,cm

ϕ ——合力与力臂法向夹角, $(^\circ)$

弹齿端点挠度 δ 为

$$\delta = \frac{L_1^3 F \cos\phi}{3EI} \tag{7}$$

其中

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \tag{8}$$

式中 E ——弹齿材料弹性模量,MPa

I ——弹齿截面惯性矩, mm^4

d ——弹齿直径,mm

最大静应力 σ 为

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{L_1 F \cos\phi}{W} \tag{9}$$

其中

$$W = \frac{\pi d^3}{32} \tag{10}$$

式中 W ——抗弯截面系数, mm^3

弹齿材料为 65 Mn 弹簧钢,杨氏模量为 1.97×10^{11} MPa, L_1 为 20 cm,直径为 5 mm。弹齿所受合力来源主要是和豆荚碰撞克服荚-柄断裂的力,由前期试验知荚柄断裂需要的力为 9 ~ 18 N,取最大值的 1.5 倍,在此记合力 $F \cos\phi$ 为 27 N。根据式 (7) 计算出弹齿前端冲击点静挠度为 10.86 mm。根据式 (9) 计算出弹齿根部最大静应力为 407 MPa。为提高弹齿使用寿命,每排弹齿都通过约束轴来减小冲击力臂(L_2 为弹齿端点到约束轴的力臂,cm),限制弹齿的最大形变,减少弹齿根部应力集中。

鲜食大豆行距 40 cm,为了一次能够收获两行豆荚,滚筒长度定为 800 mm。弹齿间距为 80 mm,相邻两排之间的弹齿错开布置。

豆荚横向主要成簇集中在主茎干四周,为确保作业时每株豆荚都能梳脱干净,需要多次击打同一植株结荚区域。滚筒经过植株结荚区域时间 t 可表示为

$$t = \frac{O}{v_f} \tag{11}$$

式中 O ——结荚区域宽度,cm

v_f ——机具前进速度,m/s

在此期间滚筒转过角度 λ 为

$$\lambda = \frac{2\pi\omega t}{60} = \frac{2\pi\omega O}{60v_f} \tag{12}$$

式中 ω ——滚筒角速度, rad/s

设每簇豆荚经过弹齿 n 次击打能够采摘干净,则滚筒上弹齿总排数 N 和 n 之间关系可表示为

$$N = \frac{2\pi n}{\lambda} = \frac{60nv_f}{O\omega} \tag{13}$$

参考表 1 结荚区域宽度 O 定为 8 cm, 机具前进速度参考一般收获机械选为 3 km/h, 则弹齿总排数 N 和击打次数 n 成正比, 和滚筒转速成反比。经过弹齿击打豆荚初步试验测试可知, 当弹齿线速度超过 10 m/s 时, 豆荚破损率明显增加。因此, 滚筒转速选择较小值 200 r/min, 此时 N 可表示为

$$N = 3n \tag{14}$$

由于鲜食大豆豆荚分布密集, 为了较好的采摘效果, 此处选取较大值 n 为 6, 则弹齿总排数定为 18 排。

2.2.2 作业效果影响因素

为了豆荚能够被有效的收集, 需要对最底部豆荚进行运动分析, 底荚应能够顺利进入滚筒和上盖板覆盖区域。如图 6, 弹齿在接触豆荚时的速度是由跟随滚筒旋转和机具前进两部分速度合成的, 即

$$\mathbf{v}_t = \mathbf{v}_r + \mathbf{v}_f \tag{15}$$

其中
$$v_r = 2\pi\omega R \tag{16}$$

$$|v_t| = \sqrt{(2\pi\omega R)^2 + v_f^2 + 2(2\pi\omega R)v_f\cos\theta} = \sqrt{(2\pi\omega R)^2 + v_f^2 + 4\pi\omega Rv_f\frac{R+H_3-H_1}{R}} \tag{17}$$

式中 v_r ——弹齿端点切向速度, m/s
 v_t —— v_r 和 v_f 的合速度, m/s

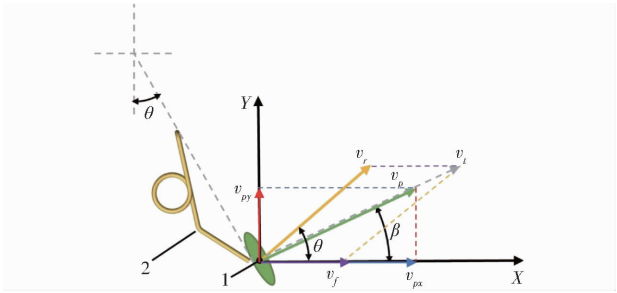


图 6 底荚运动方向示意图

Fig. 6 Schematic of bottom pod velocity

1. 底荚 2. 弹齿

撞击后豆荚速度方向和弹齿速度一致, 豆荚速度 v_p 可表示为

$$v_p = Kv_t \tag{18}$$

式中 K 为系数, 豆荚速度的水平和竖直分量分别表示为

$$\begin{aligned} v_{px} &= v_p \cos\beta = Kv_t \cos\beta \\ v_{py} &= v_p \sin\beta = Kv_t \sin\beta \end{aligned} \tag{19}$$

式中 β ——豆荚速度和水平线夹角, ($^\circ$)

如图 3, 要使最底部豆荚不被弹出掉落在地, 则底荚相对盖板点 b 平位移为 s 时, 相对盖板点 b 处竖直位移 S_y 大于竖直距离 $R\cos\theta$ 。 S 和时间 t_1 之间关系可表示为

$$S = v_{px}t_1 - v_ft_1 \tag{20}$$

$$t_1 = \frac{S}{v_{px} - v_f} = \frac{S}{Kv_t \cos\beta - v_f} \tag{21}$$

在 t_1 时间内, 底荚相对盖板点 b 竖直距离和竖直位移关系式为

$$\begin{aligned} S_y &= v_{py}t_1 - \frac{1}{2}gt_1^2 = Kv_t \sin\beta \frac{S}{Kv_t \cos\beta - v_f} - \frac{1}{2}g \left(\frac{S}{Kv_t \cos\beta - v_f} \right)^2 \geq R\cos\theta \end{aligned} \tag{22}$$

由式(22)可知, 竖直位移 S_y 是与弹齿速度 v_t 及机具前进速度 v_f 相关的函数, v_t 又与滚筒角速度 ω 、机具前进速度 v_f 、距地高度 H_3 相关, 因此可推出影响机具采收性能主要影响因素为滚筒转速、机具前进速度、割台距地高度。为验证理论分析, 提高采摘装置作业性能, 对齿滚筒式采摘装置进行单因素和多因素试验。

3 试验

3.1 试验材料及仪器设备

2021 年 11 月在浙江省杭州市萧山区选取适收期“浙鲜 86”鲜食大豆植株作为试验材料, 选取的田块鲜食大豆产量为 11 250 kg/hm², 平均株高 46.3 cm, 平均底荚高度 9.6 cm。试验仪器有自主设计弹齿滚筒采摘试验台(图 7)、AR926 型转速表、电子天平、游标卡尺(精度 0.02 mm)、50 m 皮尺、网袋等。每次试验夹持机构固定 3 株植株, 株距 25 cm, 由步进电机驱动传送带并带动夹持机构按要求速度直线运动, 变频器调节频率改变三相电机驱动滚筒的转速。



图 7 试验台架和作业场景

Fig. 7 Photo of test bench and its working scene

3.2 试验设计

3.2.1 试验因素与指标

试验因素选取前进速度(物料进给速度)、滚筒转速、割台高度。选取的试验指标为豆荚掉落率 Y_1 、挂枝率 Y_2 和破损率 Y_3 , 分别表示为

$$Y_1 = \frac{M_L}{M_T} \times 100\% \tag{23}$$

$$Y_2 = \frac{M_B}{M_T} \times 100\% \tag{24}$$

$$Y_3 = \frac{M_D}{M_T} \times 100\% \tag{25}$$

总损失率 Y_T 为

$$Y_T = Y_1 + Y_2 + Y_3 \tag{26}$$

式中 M_T ——每次试验全部豆荚总质量, g
 M_L ——每次试验后掉落地面上豆荚总质量, g
 M_B ——每次试验后仍和茎秆连接的豆荚总质量, g
 M_D ——每次试验后收集到的豆荚中破损豆荚质量, g

3.2.2 试验方法

试验方案采用三因素五水平二次正交旋转中心组合试验^[28-30],用多元二次方程来拟合因素和响应值之间的函数关系,通过对回归方程的分析来寻求最优参数组合,评估多因素的非线性影响。

对 3 个因素进行预试验,并选取总损失率相对较低区域对应的因素取值范围,作为多因素组合试验参数范围。预试验结果表明在前进速度 0.2 ~ 0.6 m/s,滚筒转速 200 ~ 300 r/min,割台高度 4 ~ 8 cm 范围时,总体损失较低,以此作为参考,组合试验因素编码如表 2 所示,每组试验重复 3 次。

表 2 试验因素编码
Tab.2 Test factors code

编码	因素		
	前进速度/	滚筒转速/	割台高度/
	(m·s ⁻¹)	(r·min ⁻¹)	cm
-1.682	0.20	200	4.0
-1	0.28	220	4.8
0	0.40	250	6.0
1	0.52	280	7.2
1.682	0.60	300	8.0

3.3 试验结果与分析

整体试验结果如表 3 所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

用 Design-Expert 软件对试验结果进行回归分析,回归模型方差分析结果如表 4 所示。在回归方程和因素显著性分析的基础上,通过 Matlab 软件生成响应面图,可直观反映各因素的交互作用对掉落率、挂枝率和破损率的影响。

(1) 豆荚掉落率

由表 4 可知,掉落率整个模型具有极显著性 ($p < 0.000\ 1$)。各参数的线性、二次效应及其交互作用对于掉落率影响的主次顺序为: X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_1 、 X_1X_3 、 X_1X_2 、 X_2X_3 ,其中 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_1 影响极显著 ($p < 0.01$), X_1X_3 、 X_1X_2 、 X_2X_3 影响显著 ($0.01 \leq p < 0.05$),其他因素不显著 ($p > 0.05$)。失拟项 $p = 0.100\ 5$,不显著。剔除不显著交互项后,掉落率回归方程为

表 3 多因素组合试验方案与结果

Tab.3 Multi-factor combination test plan and results

试验 序号	因素			$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
	X_1	X_2	X_3			
1	-1	-1	-1	14.4	2.9	3.2
2	1	-1	-1	17.2	3.6	3.6
3	-1	1	-1	10.7	7.1	8.3
4	1	1	-1	9.3	6.3	7.1
5	-1	-1	1	16.2	5.1	3.1
6	1	-1	1	19.3	5.4	3.6
7	-1	1	1	12.4	8.4	8.7
8	1	1	1	15.4	6.1	6.1
9	-1.682	0	0	14.3	5.7	7.9
10	1.682	0	0	16.8	6.0	6.0
11	0	-1.682	0	18.3	4.8	1.6
12	0	1.682	0	11.6	8.7	10.4
13	0	0	-1.682	10.5	4.3	6.4
14	0	0	1.682	14.1	7.1	5.9
15	0	0	0	11.9	6.3	6.8
16	0	0	0	12.7	5.2	6.3
17	0	0	0	11.6	5.5	5.7
18	0	0	0	12.1	5.7	6.9
19	0	0	0	11.8	6.1	5.3
20	0	0	0	12.5	6.3	6.6
21	0	0	0	13.2	5.7	5.7
22	0	0	0	12.4	5.5	6.1
23	0	0	0	12.3	5.3	7.2

$$Y_1 = 12.28 + 0.86X_1 - 2.24X_2 + 1.3X_3 - 0.54X_1X_2 + 0.59X_1X_3 + 0.49X_2X_3 + 1.15X_1^2 + 0.94X_2^2 \tag{27}$$

前进速度和滚筒转速对掉落率的影响如图 8a 所示。保持滚筒转速不变,掉落率随前进速度增加呈先降低后增加的趋势;当固定前进速度时,掉落率随滚筒转速增加呈先降低后增加的趋势。前进速度从 0.4 m/s 逐渐增加,滚筒转速从 250 r/min 逐渐降低,因素间交互作用导致掉落率显著增加。前进速度由低到高,对应的掉落率最低点的滚筒转速在 250 r/min 逐渐加大到 280 r/min,在较大前进速度工作时应适当加大滚筒转速。从整体看掉落率最低区域对应的滚筒转速在 250 r/min 附近,前进速度在 0.3 m/s 附近。

前进速度和割台高度对掉落率的影响如图 8b 所示。当前进速度和割台高度同时增加时,交互作用会导致掉落率显著增加。前进速度不超过 0.4 m/s 时,前进速度和割台高度对掉落率影响均比较小。在较大前进速度时,割台高度的降低会显著减小掉落率。整体来看,掉落率最低区域对应的割台高度在 4 cm 附近,前进速度为 0.4 m/s。因此在土地平整度较差田块,可以适当降低机具前进速

表 4 回归模型方差分析

Tab.4 Variance analysis of regression model

方差来源	自由度	掉落率			挂枝率			破损率		
		平方和	F	p	平方和	F	p	平方和	F	p
模型	9	143.38	39.23	<0.000 1 **	34.47	16.52	<0.000 1 **	80.81	16.07	<0.000 1 **
X_1	1	10.03	24.7	0.000 3 **	0.186 4	0.803 9	0.386 2	2.72	4.87	0.046 *
X_2	1	68.42	168.47	<0.000 1 **	22.32	96.27	<0.000 1 **	72.65	130.01	<0.000 1 **
X_3	1	23.08	56.83	<0.000 1 **	7.05	30.39	0.000 1 **	0.173 9	0.311 1	0.586 5
X_1X_2	1	2.31	5.69	0.033 *	2.1	9.06	0.01 *	2.76	4.94	0.044 6 *
X_1X_3	1	2.76	6.8	0.021 7 *	0.451 2	1.95	0.186 4	0.211 2	0.378	0.549 3
X_2X_3	1	1.9	4.68	0.049 7 *	1.05	4.53	0.052 9	0.031 3	0.055 9	0.816 7
X_1^2	1	21.08	51.9	<0.000 1 **	0.066	0.284 7	0.602 7	0.032 6	0.058 3	0.813
X_2^2	1	14.03	34.54	<0.000 1 **	1.02	4.41	0.055 7	1.34	2.4	0.145 2
X_3^2	1	0.000 1	0.000 3	0.986 7	0.219 3	0.945 9	0.348 5	0.896 8	1.6	0.227 5
残差	7	5.28			3.01			7.26		
失拟项	3	3.32	2.72	0.100 5	1.65	1.95	0.192	4	1.96	0.190 3

注：**表示极显著($p < 0.01$)；*表示显著($0.01 \leq p < 0.05$)。

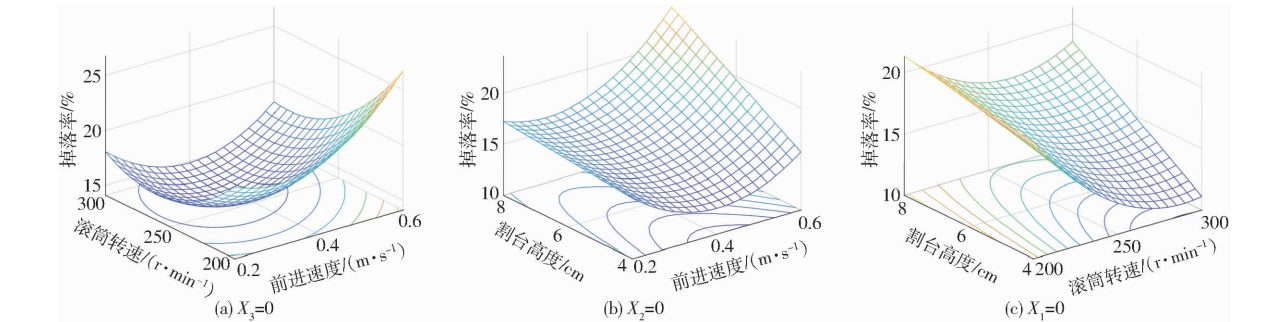


图 8 因素交互作用对掉落率影响的响应曲面

Fig. 8 Response surfaces for effect of factor interactions on drop rate

度,增加割台高度来保证收获质量。

滚筒转速和割台高度对掉落率的影响如图 8c 所示。在割台高度处于较大值时,掉落率随滚筒转速增加呈先降低后增加的趋势;割台高度处于较小值时,掉落率和滚筒转速呈负相关;当滚筒转速保持不变时,掉落率和割台高度呈负相关,割台高度的减小可以显著降低掉落率。整体来看,掉落率最低时对应的滚筒转速在 280 r/min 附近,割台高度在 4 cm 附近。

(2) 豆荚挂枝率

由表 4 可知,挂枝率整个模型具有显著性($p < 0.000 1$)。各参数的线性、二次效应及其交互作用对于挂枝率影响的主次顺序为 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 ,其中 X_1X_2 影响显著, X_2 、 X_3 影响极显著,其他因素不显著。失拟项 $p = 0.192$,不显著。剔除不显著交互项后,挂枝率回归方程为

$$Y_2 = 5.79 - 0.12X_1 + 1.28X_2 + 0.72X_3 - 0.51X_1X_2 \tag{28}$$

前进速度和滚筒转速对挂枝率的影响如图 9 所示。较大的滚筒转速下弹齿容易打断植株主茎干,导致豆荚不能从茎秆上有效梳脱,从而造成挂枝率

增加。在低滚筒转速下,随着前进速度增加,弹齿的单株梳脱次数会降低,也会导致挂枝率增加。但在较高滚筒转速下,弹齿的单株梳脱次数总能高于阈值,此时前进速度的变化对挂枝率的影响则不显著。从整体看当滚筒转速为 200 r/min 附近,前进速度为 0.2 m/s 左右时挂枝率存在最低值。

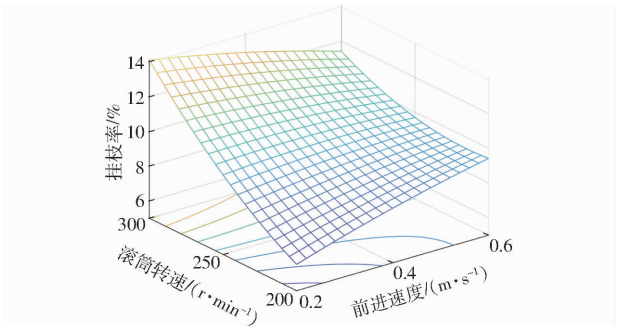


图 9 因素交互作用对挂枝率影响的响应曲面 ($X_3 = 0$)

Fig. 9 Response surface for effect of factor interactions on branching rate

(3) 豆荚破损率

由表 4 可知,破损率整个模型具有极显著性($p < 0.000 1$)。各参数的线性、二次效应及其交互

作用对于破损率影响显著的主次顺序为 X_2 、 X_1X_2 、 X_1 , 其中 X_2 影响极显著, X_1X_2 、 X_1 影响显著, 其他因素不显著。失拟项 $p = 0.1903$, 不显著。剔除不显著交互项后, 破损率回归方程为

$$Y_3 = 6.02 - 0.45X_1 + 2.31X_2 - 0.11X_3 - 0.59X_1X_2$$

(29)

前进速度和滚筒转速对破损率的影响如图 10 所示。在前进速度小于 0.4 m/s 时, 破损率和滚筒转速基本呈负相关; 当滚筒转速大于 250 r/min 时前进速度和破损率负相关, 当滚筒转速小于 250 r/min 时为正相关。减小前进速度会增加弹齿和豆荚碰撞次数, 增大滚筒转速会增加弹齿击打力, 两者交互导致破损率显著增加。随着前进速度增加, 滚筒转速的改变对减少破损率的作用效果减弱, 对应的破损率最低值也逐渐有小幅增加。从响应面图总体可看出, 当滚筒转速为 200 r/min 附近, 前进速度为 0.2 m/s 左右时破损率最低。

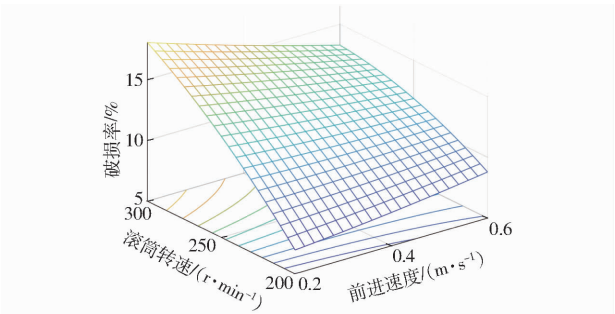


图 10 因素交互作用对破损率影响的响应曲面 ($X_3 = 0$)

Fig. 10 Response surface for effect of factor interactions on breakage rate

3.4 参数优化与试验验证

3.4.1 参数优化

为获得弹齿滚筒式鲜食大豆采摘装置的最优性能参数组合, 采用粒子群优化算法对 3 个回归模型进行最优值求解, 总损失函数 Y_T 约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_T = Y_1 + Y_2 + Y_3 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1.682 \leq X_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_3 \leq 1.682 \end{cases} \end{cases}$$

(30)

初始化粒子数 100 个, 迭代 500 次, 适应度曲线如图 11 所示。总损失率最低时, 掉落率为 10.6%, 挂枝率为 4.4%, 破损率为 5.6%, 对应的前进速度为 0.43 m/s, 滚筒转速为 245 r/min, 割台高度为 4 cm。

3.4.2 验证试验

(1) 台架试验验证

为了验证优化结果的准确性, 对得到的最优

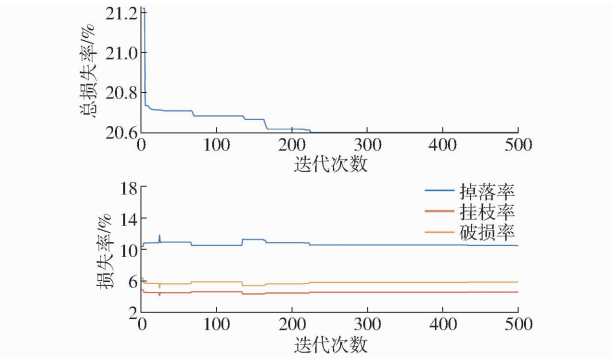


图 11 粒子群优化适应度曲线

Fig. 11 Particle swarm optimization fitness curves

组合参数进行试验验证, 试验材料和试验仪器与上述台架试验保持一致, 以前进速度 0.43 m/s、滚筒转速 245 r/min、割台高度 4 cm 进行试验, 试验共进行 10 次。结果如表 5 所示, 对试验结果取平均值得出, 掉落率 11.1%, 挂枝率 4.7%, 破损率 5.2%, 与理论预测值相对误差均不高于 7.6%。通过方差分析, 各评价指标 10 次台架试验值和预测值之间不具有显著性差异 ($p > 0.05$)。

表 5 台架验证试验值与预测值对比

Tab.5 Comparison of bench verification test value and predicted value				%
指标	掉落率	挂枝率	破损率	
预测值	10.6	4.4	5.6	
试验均值	11.1	4.7	5.2	
相对误差	4.5	6.4	7.6	

(2) 大田试验验证

2022 年 8 月 29—31 日在浙江省杭州市萧山区进行田间试验验证, 试验地块与台架试验取样地一致。以前进速度 0.43 m/s、滚筒转速 245 r/min、割台高度 4 cm 进行试验, 试验现场如图 12 所示, 每隔 10 m 采收为一组试验, 共进行 10 次重复试验。结果如表 6 所示, 对试验结果取平均值得出, 掉落率为 11.8%, 挂枝率 4.0%, 破损率 6.1%。与理论预测值相对误差均不高于 10.1%。通过方差分析, 各评价指标 10 次田间试验值和预测值之间不具有显著性差异 ($p > 0.05$)。



图 12 田间试验

Fig. 12 Field experiment pictures

表 6 田间验证试验值与预测值对比

Tab.6 Comparison of field validation test values and predicted values %

指标	掉落率	挂枝率	破损率
预测值	10.6	4.4	5.6
试验值	11.8	4.0	6.1
相对误差	10.1	10.0	8.2

4 结论

(1)结合鲜食大豆种植模式和采摘期植株物理特性,优化设计了一种弹齿滚筒式鲜食大豆采摘装置。影响采摘因素主要为前进速度、滚筒转速、割台

高度,采摘损失主要为掉落、挂枝和破损。各参数的合适调节范围为:前进速度 0.2~0.6 m/s、滚筒转速 200~300 r/min、割台高度 4~8 cm。

(2)分别建立了掉落率、挂枝率和破损率与因素间的数学模型。各因素对掉落率和挂枝率指标的影响依次为:滚筒转速、割台高度、前进速度;对破损率指标的影响依次为:滚筒转速、前进速度、割台高度。以总损失最低为目标进行优化,结果表明:最优参数组合为前进速度 0.43 m/s、滚筒转速 245 r/min、割台高度 4 cm,掉落率、挂枝率和破损率田间试验值分别为 11.8%、4.0%、6.1%。

参 考 文 献

[1] 刘志远,金诚谦,冯玉岗,等. 鲜食大豆收获机械化发展现状[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(5): 228-236.
LIU Zhiyuan, JIN Chengqian, FENG Yugang, et al. Current status of soya bean harvest mechanization[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(5): 228-236. (in Chinese)

[2] 秦广明,宋志禹,肖宏儒. 5TD60 型青大豆脱荚机性能试验研究[J]. 农业装备技术, 2011, 37(5): 25-26.
QIN Guangming, SONG Zhiyu, XIAO Hongru. Experiment research on performance of 5TD60 green soybean huller[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2011, 37(5): 25-26. (in Chinese)

[3] 王福义. 5MDZJ-380-1400 型毛豆摘荚机的设计[J]. 农业科技与装备, 2016(9): 11-13.
WANG Fuyi. Design of 5MDZJ-380-1400 type green soybean pods picking machine[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2016(9): 11-13. (in Chinese)

[4] 夏先飞,陈巧敏,肖宏儒,等. 我国食用豆机械化收获技术发展现状及对策[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(5): 22-28.
XIA Xianfei, CHEN Qiaomin, XIAO Hongru, et al. Research on current status and developing strategy of pulses crops mechanized harvesting technology in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(5): 22-28. (in Chinese)

[5] 倪有亮,金诚谦,陈满,等. 我国大豆机械化生产关键技术与装备研究进展[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(12): 17-25.
NI Youliang, JIN Chengqian, CHEN Man, et al. Research progress on mechanized production technology and equipment of soybean in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(12): 17-25. (in Chinese)

[6] 段以磊,孔令军,陈永成,等. 弹齿滚筒式辣椒采摘装置采摘板椒的机械损伤特性与机理[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 79-82.
DUAN Yilei, KONG Lingjun, CHEN Yongcheng, et al. Tine drum pepper picking device picking hot pepper mechanical damage characteristics and mechanism[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1): 79-82. (in Chinese)

[7] 王伯凯,顾峰玮,于昭洋,等.轴流式全喂入花生收获机捡拾机构设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(10):132-141.
WANG Bokai, GU Fengwei, YU Zhaoyang, et al. Design and experiment of picking-up mechanism of axial-flow full-feed peanut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 132-141. (in Chinese)

[8] 雷明举,孔令军,陈永成,等. 弹齿滚筒式辣椒采摘装置的研究设计[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 161-165.
LEI Mingju, KONG Lingjun, CHEN Yongcheng, et al. Research on the chili picking device of spring tooth roller-type[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1): 161-165. (in Chinese)

[9] 刘磊,吴腾,孔凡婷,等. 辊刷式蓖麻收获机采摘机构优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 19-29.
LIU Lei, WU Teng, KONG Fanting, et al. Optimized design and experiment of the picking mechanism for brush-roller castor harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(8): 19-29. (in Chinese)

[10] 伍德林,袁嘉豪,李超,等. 扭梳式油茶果采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 21-33.
WU Delin, YUAN Jiahao, LI Chao, et al. Design and experiment of twist-comb end effector for picking camellia fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 21-33. (in Chinese)

[11] 袁小伟,杨双平,金若成,等. 双螺旋对辊式辣椒收获装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 1-9.
YUAN Xiaowei, YANG Shuangping, JIN Ruocheng, et al. Design and experiment of double helix pair roller pepper harvesting device[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(15): 1-9. (in Chinese)

[12] 赵映,刘守荣,肖宏儒,等. 基于立式辊机构的青毛豆脱荚装置力学分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 17-23.
ZHAO Ying, LIU Shourong, XIAO Hongru, et al. Mechanical analysis and experiment on green soybean pod cleaning device based on vertical roller mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 17-23. (in Chinese)

- [13] 金月, 秦广明, 陈巧敏, 等. 青毛豆采摘机脱荚装置设计参数的试验研究[J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(5): 869–876.
JIN Yue, QIN Guangming, CHEN Qiaomin, et al. An experimental research on the design parameters of pods-off device in green soybean picking machine[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2015, 38(5): 869–876. (in Chinese)
- [14] 韩豹, 郭畅, 高英玲, 等. 大豆株间除草单体机构及关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 112–121.
HAN Bao, GUO Chang, GAO Yingling, et al. Design and experiment of soybean intra-row weeding monomer mechanism and key components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 112–121. (in Chinese)
- [15] 赵淑红, 杨罗罗, 张鑫, 等. 大豆垄上双行免耕播种机锯齿式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 74–84.
ZHAO Shuhong, YANG Luoluo, ZHANG Xin, et al. Design and experiment of zigzag opener for double-row no-tillage seeding on soybean ridge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 74–84. (in Chinese)
- [16] 侯守印, 邹震, 魏志鹏, 等. 柔性机械式大豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 77–86.
HOU Shouyin, ZOU Zhen, WEI Zhipeng, et al. Design and experiment of flexible mechanical soybean precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 77–86. (in Chinese)
- [17] MBUVI S, LITCHFIELD J B. Mechanical shelling and combine harvesting of green soybeans[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1994, 10(3): 351–355.
- [18] ZANDONAD R, COOLONG T, PFEIFFER T. Mechanical harvesting of edamame[J/OL]. SARE Proj Final Rep. https://www.uky.edu/ccd/sites/www.uky.edu/ccd/files/edamame_mechanical_harvest.pdf.
- [19] 张凯, 孙振宇, 赵东, 等. 青毛豆采摘装置的虚拟设计与仿真分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(1): 144–147.
ZHANG Kai, SUN Zhenyu, ZHAO Dong, et al. Virtual design and simulation analysis of picking device of the green soy bean[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(1): 144–147. (in Chinese)
- [20] 王显锋. 自走式鲜食大豆摘荚机关键部件设计[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
WANG Xianfeng. Design of key parts for a self-propelled green soybean pods picking machine[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [21] 涂福泉, 李恒, 肖程, 等. 双弹指毛豆采摘装置的设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(3): 89–93.
TU Fuquan, LI Heng, XIAO Cheng, et al. The design and motion simulation of double finger soybean picking device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(3): 89–93. (in Chinese)
- [22] 蓝占城. 鲜食春大豆产量和品质分析及南北种植比较研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
LAN Zhancheng. Yield and quality analysis of spring vegetable soybean and comparison of planting in north and south of China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [23] BRABANDT H, EHLERT D. Chamomile harvesters: a review[J]. Industrial Crops and Products, 2011, 34(1): 818–824.
- [24] EHLERT D, BEIER K. Development of picking devices for chamomile harvesters[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2014, 1(3): 73–80.
- [25] FAROOQUE A A, ZAMAN Q U, GROULX D, et al. Effect of ground speed and header revolutions on the picking efficiency of a commercial wild blueberry harvester[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014, 30(4): 535–546.
- [26] JAMEEL M W, ZAMAN Q U, SCHUMANN A W, et al. Effect of plant characteristics on picking efficiency of the wild blueberry harvester[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2016, 32(5): 589–598.
- [27] 赵永满, 刁雪洋, 陈永成, 等. 辣椒收获机复摘装置的研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(7): 105–110.
ZHAO Yongman, DIAO Xueyang, CHEN Yongcheng, et al. Design of the divided no-till wheat planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(7): 105–110. (in Chinese)
- [28] 何晓宁, 张学军, 赵壮, 等. 反向旋抛式油莎豆起挖装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 34–43.
HE Xiaoning, ZHANG Xuejun, ZHAO Zhuang, et al. Design and optimization tests of reverse spin-throwing *Cyperus edulis* starting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 34–43. (in Chinese)
- [29] 陈桂斌, 王庆杰, 李问盈, 等. 对辊差速式块状有机肥破碎施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 65–76.
CHEN Guibin, WANG Qingjie, LI Wenying, et al. Design and experiment of double roller differential speed crushing fertilizer device for block organic fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 65–76. (in Chinese)
- [30] 李金凤, 赵继云, 刘思瑶, 等. 自走式豌豆割晒机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 107–116.
LI Jinfeng, ZHAO Jiayun, LIU Siyao, et al. Design and experiment of self-propelled pea windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 107–116. (in Chinese)