doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.031

基于油茶枝果力学模型的振动脱果仿真与试验

赵恩龙[1,2]　赵金辉[1,2]　庄腾飞[1,2]　靳文停[1,2]　刘立晶[1,2]　苑严伟[1,2]
(1.中国农业机械化科学研究院集团有限公司,北京 100083;2.农业装备技术全国重点实验室,北京 100083)

摘要:针对目前油茶果人工采摘劳动强度大等问题,探究了一种油茶枝干振动式采摘机合适的工作参数,提高采摘效率,降低劳动强度。本文对油茶树枝干受迫振动采摘原理进行分析,得到影响油茶树枝干被迫振动的主要因素包括激振装置工作参数(激振位置、激振频率、激振时间)和油茶树物理参数(杨氏模量、枝干转动惯量、密度、横截面积)。建立油茶枝干-果实-激振装置刚柔耦合动力学模型并进行单因素仿真。设计三因素三水平正交试验,分析各因素交互作用对试验结果的影响,得到最优参数组合为:激振位置 300 mm、激振频率 13.44 Hz 和激振时间 7.15 s,此时,油茶果实脱落率 93.86%、花苞脱落率 22.62%。验证试验油茶果实脱落率与优化值相差 2.62 个百分点,花苞脱落率与优化值相差 1.46 个百分点,在可接受范围内,同时有效降低了劳动强度。

关键词:树干动式;油茶果采摘;枝干动力学模型;仿真
中图分类号:S225.93　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0365-10　　**OSID**:

Simulation Analysis and Experiment of Vibration Fruit Removal Based on Mechanical Model of *Camellia oleifera*

ZHAO Enlong[1,2]　ZHAO Jinhui[1,2]　ZHUANG Tengfei[1,2]　JIN Wenting[1,2]　LIU Lijing[1,2]　YUAN Yanwei[1,2]
(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In view of the current situation of *Camellia oleifera* fruit harvesting mainly relying on manual labor, low production efficiency and high labor cost, in order to solve the significant problems of *Camellia oleifera* fruit harvesting which seriously hinder the development of *Camellia oleifera* industry, explore a suitable vibrating picker for *Camellia oleifera* branches and trunks with suitable working parameters, and improve the picking efficiency and reduce labor intensity. The principle of forced vibration picking of the branches and trunks of the *Camellia oleifera* tree was analyzed, and the main factors affecting the forced vibration of the branches and trunks of the *Camellia oleifera* tree were obtained, including the working parameters of the excitation device (excitation position, excitation frequency, and excitation time) and the physical parameters of the *Camellia oleifera* tree (Young's modulus, rotational moment of inertia of the branches and trunks, density, and cross-sectional area). The rigid-flexible coupling model of *Camellia oleifera* branch - fruit - excitation device was established and analyzed by one-factor simulation, and the level codes of field test factors were obtained. A three-factor, three-level field orthogonal test was designed to analyze the effects of the interaction of the factors on the test results. Under the combination of the optimal parameters of excitation position of 300 mm, excitation frequency of 13.44 Hz, and excitation time of 7.15 s, the shedding rate of *Camellia oleifera* fruits was 93.86%, and that of buds was 22.62%. Verification test showed that the relative error between *Camellia oleifera* fruit shedding rate and optimized value was 2.62 percent point, the relative error between bud shedding rate and optimized value was 1.46 percent point, the bud damage was less than 30% compared to that of manual picking, which was within the acceptable range, and effectively reduced labor intensity.

Key words: trunk vibration type; *Camellia oleifera* fruit picking; branch dynamics model; simulation

收稿日期:2024-07-02　修回日期:2024-08-04
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2202100)
作者简介:赵恩龙(1995—),男,博士生,主要从事农业机械化装备及关键技术研究,E-mail:zhaoenlong696@163.com
通信作者:苑严伟(1980—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械自动控制与智能化仪器研究,E-mail:yyw215@163.com

0 引言

油茶(*Camellia oleifera*)是我国重要的木本油料树种,被世界粮农组织优选为健康食用油原料之一[1]。截止到 2021 年,全国油茶林种植面积 4.592×10^6 hm^2,年产茶油 8.89×10^5 t,茶油已成为继大豆、油菜、花生、棉籽后我国第 5 大油料作物,发展油茶是增加我国食用油产能的重要途径,对维护国家粮油安全具有重要作用。油茶一般种植于丘陵山地[2],主要依靠人工采收,采摘劳动强度大,效率低,危险系数高,生产成本逐年攀升[3],同时人工采摘造成花苞脱落率达到 30% 左右[4]。

利用振动原理采摘果实是林果收获的有效方式之一[5-6],国内外相关科研人员已经对林果机械化收获的激振参数与收获效果进行了相关研究[7-13]。通过建立的数学模型可得林果激振收获影响因素,COOKE 等[14-15]对"长柄果"果实动力学模型进行了分析,完善了"果实-果柄"系统线性动力学原理。伍德林等[16-18]建立了油茶"果实-枝条"双摆动力学模型和 5 自由度油茶果质量弹性阻尼动力学模型,通过求解得出系统固有频率,以及不同参数组合条件下各级枝干之间能量传递。LÁNG[19]建立了单自由度樱桃树模型,对激振激励后樱桃树的响应状态进行了分析,得到樱桃激振收获与周期性水平和垂直平面位移有关。GUPTA 等[20-21]建立了数学模型,并预测柑橘二级枝激振状态和二级枝和果实分布情况。杨会民等[22]利用有限元分析软件对杏树进行了建模,研究不同振动特性参数(时间、频率和振幅等)对杏树振动的影响。WEI 等[23]对开心果机械化收获过程中的受力开展研究,得到开心果脱落的主要影响因素包括作用力、频率、振幅和作用位置,同时建立了振动装置与果树刚柔耦合模型,分析了开心果树振动响应特性。

综上所述,动力学模型在林果采收方面具有重要作用,通过动力学模型可确定系统响应变化与影响因素关系,进而实现林果采摘装备工作参数优化。虽然有一些学者针对油茶树建立了相关动力学模型,但少见对油茶树枝干受迫振动响应研究。本文对油茶树枝干激振动力学模型进行理论分析,获得影响枝干受迫振动响应的主要因素,利用动力学软件进行仿真模拟,验证理论分析结果并进行单因素试验;设计正交试验并优化获得最佳激振参数,以期提高油茶果采摘效率,实现丘陵山区油茶果机械化采摘。

1 激振式林果采摘机结构与工作原理

1.1 激振式林果采摘机结构

自主研发的便携激振式林果采摘机由激振器组件、传动装置组件、操作手柄组件和动力源组件组成。整机结构如图 1 所示。



图 1 便携激振式林果采摘机实物图

Fig. 1 Portable excitation type forest fruit picker

1. 激振器组件 2. 传动装置组件 3. 操作手柄组件 4. 动力源组件

便携激振式油茶果采摘机可将整机拆卸为上(激振器组件和二级传动杆)、下(操作手柄组件和一级传动杆)两部分运输,具有安装简单、运输方便等特点,该激振装置可实现采收频率多级调节,可用于不同林果激振采收,使用范围广。

表 1 便携激振式林果采摘机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of portable excitation type forest fruit picker

参数	数值/型式
整机质量(不含电池)/kg	3.6
整机长度/mm	1 850
动力源类型	锂电池
锂电池容量/(A·h)	12
电机功率/kW	0.65
激振频率/Hz	0~30
振动幅值/mm	25
果实脱落率/%	≥85

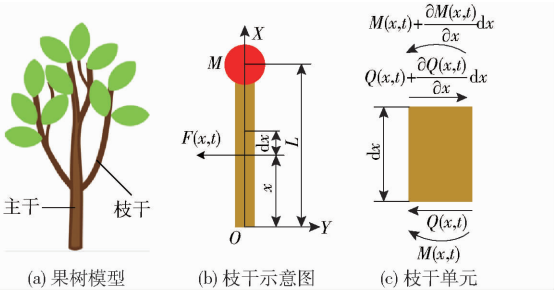
1.2 工作原理

便携激振式林果采摘机工作原理:操作者手持激振装置靠近果树,选中适当的果树并使用采摘机末端执行器 U 形夹钩挂枝干,打开控制开关,电机带动一级传动杆、二级传动杆转动,传动杆将旋转的动力传递给激振组件,激振组件中的曲柄滑块装置将旋转的运动转换为沿直线往复运动。通过 U 形夹与枝条将激振能量传递给果实,使果实加速运动,当果实惯性力大于果实-果柄之间的结合力时,果实脱落。

2 油茶树枝干动力学模型

由于油茶树枝干生长在主干上,且斜向上延伸

生长，即油茶树枝干可视为一端固定，另一端为自由端，所以油茶树枝干生长特点符合欧拉-伯努利梁结构[24-25]。将油茶树枝干简化为悬臂梁结构，靠近主干一端为坐标原点 O，建立直角坐标系 XOY，对单位长度油茶树进行受力分析，如图 2 所示，通过分析作用在简化梁模型上的力，可以更好地了解果树在激振采收过程中的力学特性。



(a) 果树模型　(b) 枝干示意图　(c) 枝干单元

图 2　油茶树枝条激振简化模型示意图

Fig. 2　Schematics of simplified model of branch excitation of *Camellia oleifera* branches

将油茶树枝干模型简化为一端质量集中的悬臂梁模型，在 x 处截取任意截面长度 $\mathrm{d}x$，L 为油茶树枝干长度，m；M 为油茶树枝干冠层质量，kg。根据牛顿第二定律可得

$$\rho S\mathrm{d}x\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}=F(x,t)\mathrm{d}x+Q(x,t)-\left(Q(x,t)+\frac{\partial Q(x,t)}{\partial x}\mathrm{d}x\right) \tag{1}$$

式中　ρ——油茶树枝干密度，kg/m^3

S——油茶树枝干横截面积，m^2

$y(x,t)$——枝干沿 Y 轴方向位移，m

$F(x,t)$——作用在枝干上的外力，N/m

$Q(x,t)$——剪切力，N

化简式(1)得到

$$\rho S\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}+\frac{\partial Q(x,t)}{\partial x}=F(x,t) \tag{2}$$

不考虑受力单元旋转影响，根据动量矩定理，有

$$M(x,t)+\frac{\partial M(x,t)}{\partial x}\mathrm{d}x-(M(x,t)+Q(x,t)\mathrm{d}x)=0 \tag{3}$$

式中　$M(x,t)$——弯矩，N·m

化简式(3)得到

$$\frac{\partial M(x,t)}{\partial x}=Q(x,t) \tag{4}$$

将式(4)代入式(2)得

$$\rho S\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}+\frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2}=F(x,t) \tag{5}$$

根据材料力学可知，弯矩与挠度满足

$$M(x,t)=EI\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \tag{6}$$

式中　E——油茶树枝干杨氏模量，Pa

I——油茶树枝干横截面绕中轴转动惯量，mm^4

将式(6)代入式(5)得

$$\rho S\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}+\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(EI\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}\right)=F(x,t) \tag{7}$$

将式(7)化简整理得到油茶树枝干受迫激振微分方程为

$$\rho S\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}+EI\frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4}=F(x,t) \tag{8}$$

则油茶树枝干自由激振微分方程为

$$\frac{\rho S}{EI}\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}+\frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4}=0 \tag{9}$$

由于 $y(x,t)$ 为 x 关于时间 t 的函数，采用分离变量法求其子方程的解，设其解为

$$y(x,t)=\psi(x)T(t) \tag{10}$$

式中　$\psi(x)$——油茶树枝干振型函数

将式(10)代入式(9)整理得

$$\frac{\mathrm{d}^4\psi(x)}{\mathrm{d}x^4}\frac{1}{\psi(x)}\frac{EI}{\rho S}=-\frac{\mathrm{d}^2 T(t)}{\mathrm{d}t^2}\frac{1}{T(t)}=\omega^2 \tag{11}$$

式中　ω——频率

可得关于时间 t 的微分方程为

$$\frac{\mathrm{d}^2 T(t)}{\mathrm{d}t^2}+\omega^2 T(t)=0 \tag{12}$$

式(10)的通解为简谐函数，即

$$T(t)=A\sin(\omega t)+B\cos(\omega t)=C\sin(\omega t+\varphi) \tag{13}$$

式中　A、B、C——振幅常数

φ——相位

同样，可得关于激振位置 x 的微分方程为

$$\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2}\left(EI\frac{\mathrm{d}^2\psi(x)}{\mathrm{d}x^2}\right)-\omega^2\rho S\psi(x)=0 \tag{14}$$

因为密度 ρ、横截面积 S、横截面对中心轴转动惯量 I 均为常数，令

$$\beta^4=\omega^2\frac{\rho S}{EI} \tag{15}$$

式中　β——常数

整理式(14)得

$$\frac{\mathrm{d}^4\psi(x)}{\mathrm{d}x^4}-\beta^4\psi(x)=0 \tag{16}$$

式(16)为四阶线性定常微分方程，设其解为 $\psi(x)=\mathrm{e}^{px}$，则可得特征方程为

$$p^4-\beta^4=0 \tag{17}$$

可得特征方程 4 个特征根为

$$\begin{cases} p_{1,2} = \pm\beta \\ p_{2,3} = \pm \mathrm{i}\beta \end{cases} \tag{18}$$

因此,方程(16)解为

$$\psi(x) = D_1 \mathrm{e}^{\beta x} + D_2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}\beta x} + D_3 \mathrm{e}^{-\beta x} + D_4 \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\beta x} \tag{19}$$

式中 D_1、D_2、D_3、D_4——系数,常数

又由于

$$\begin{cases} \mathrm{e}^{\pm\beta x} = \mathrm{ch}(\beta x) \pm \mathrm{sh}(\beta x) \\ \mathrm{e}^{\pm \mathrm{i}\beta x} = \cos(\beta x) \pm \mathrm{i}\sin(\beta x) \end{cases} \tag{20}$$

其中

$$\begin{cases} \mathrm{sh}(\beta x) = \dfrac{\mathrm{e}^{\beta x} - \mathrm{e}^{-\beta x}}{2} \\ \mathrm{ch}(\beta x) = \dfrac{\mathrm{e}^{\beta x} + \mathrm{e}^{-\beta x}}{2} \end{cases} \tag{21}$$

油茶树枝干激振函数为

$$\psi(x) = C_1\cos(\beta x) + C_2\sin(\beta x) + C_3\mathrm{ch}(\beta x) + C_4\mathrm{sh}(\beta x) \tag{22}$$

式中 C_1、C_2、C_3、C_4——系数,常数

由于油茶树枝干属于悬臂梁模型,存在一个固定端和另一个质量集中的自由端,因此其边界条件为

$$\begin{cases} \psi(0) = 0 \\ \dfrac{\mathrm{d}\psi(0)}{\mathrm{d}x} = 0 \\ \dfrac{\mathrm{d}^2\psi(L)}{\mathrm{d}x^2} = 0 \\ EI\dfrac{\mathrm{d}^3\psi(0)}{\mathrm{d}x^3} + M\omega^2\psi(L) = 0 \end{cases} \tag{23}$$

式中 L——油菜枝干长度,m

将式(23)代入式(22)得到

$$\begin{cases} C_1 + C_3 = 0 \\ \beta(C_2 + C_4) = 0 \\ -\beta^2\cos(\beta L)C_1 - \beta^2\sin(\beta L)C_2 + \beta^2\mathrm{ch}(\beta L)C_3 + \beta^2\mathrm{sh}(\beta L)C_4 = 0 \\ (EI\beta^3\sin(\beta L) + M\omega^2\cos(\beta L))C_1 + (EI\beta^3\cos(\beta L) + M\omega^2\sin(\beta L))C_2 + \\ \quad (EI\beta^3\mathrm{sh}(\beta L) + M\omega^2\mathrm{ch}(\beta L))C_3 + (EI\beta^3\mathrm{ch}(\beta L) + M\omega^2\mathrm{sh}(\beta L))C_4 = 0 \end{cases} \tag{24}$$

则 C_1、C_2、C_3、C_4参数矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\beta^2\cos(\beta L) & -\beta^2\sin(\beta L) & \beta^2\mathrm{ch}(\beta L) & \beta^2\mathrm{sh}(\beta L) \\ EI\beta^3\sin(\beta L) + M\omega^2\cos(\beta L) & EI\beta^3\cos(\beta L) + M\omega^2\sin(\beta L) & EI\beta^3\mathrm{sh}(\beta L) + M\omega^2\mathrm{ch}(\beta L) & EI\beta^3\mathrm{ch}(\beta L) + M\omega^2\mathrm{sh}(\beta L) \end{bmatrix} = 0 \tag{25}$$

油茶树枝干振动函数为

$$\begin{aligned} y(x,t) &= \psi(x)T(t) = (C_1\cos(\beta x) + C_2\sin(\beta x) + C_3\mathrm{ch}(\beta x) + C_4\mathrm{sh}(\beta x))\sin(\omega t + \varphi) = \\ &\left(C_1\cos\sqrt[4]{\omega^2\frac{\rho S}{EI}}x + C_2\sin\sqrt[4]{\omega^2\frac{\rho S}{EI}}x + C_3\mathrm{ch}\sqrt[4]{\omega^2\frac{\rho S}{EI}}x + C_4\mathrm{sh}\sqrt[4]{\omega^2\frac{\rho S}{EI}}x\right)\sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \tag{26}$$

通过分析油茶树枝干激振函数,可知在激励力 $F(x,t)$ 作用下,影响油茶果实脱落效果的因素包括激振装置工作参数和油茶树物理参数,其中工作参数有激振位置 x、激振频率 ω,油茶树物理参数有枝干杨氏模量 E、转动惯量 I、密度 ρ 和横截面积 S。

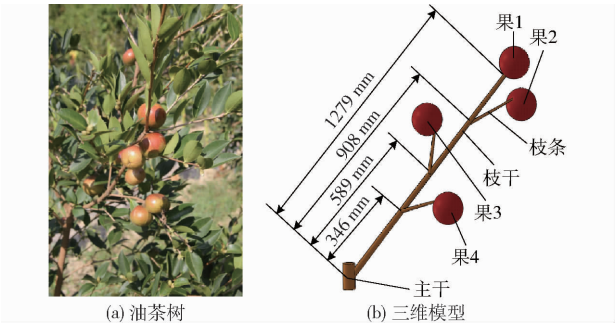
根据冲量定理可知,力作用在物体上,不同作用时长物体所受冲量不同。所以,作用在油茶树枝干激振时间也是影响因素之一,为激振装置工作参数。

3 刚柔耦合仿真试验

由于相同品种油茶树枝干物理参数差异性较小[26],本文忽略油茶树物理参数的影响,仅针对激振装置工作参数进行研究。因此,本文主要考虑激振位置、激振频率和激振时间对油茶树枝干受迫激振响应的影响。

3.1 刚柔耦合模型建立

建立的仿真模型包括油茶树枝干和果实。根据油茶树(图 3a)进行物理尺寸测量,确定枝干果实相对位置关系,利用 Solidworks 绘制油茶树枝干和果实三维模型如图 3b 所示。



(a) 油茶树 (b) 三维模型

图 3 刚柔耦合仿真模型

Fig. 3 Rigid-flexible coupling simulation models

3.2 模型设置

3.2.1 油茶树枝条柔性化

为了提高运动学仿真结果准确性,对油茶树枝干进行柔性建模。利用 ADAMS 软件中的柔性体替换刚性体的功能,将刚性油茶树枝干柔性化后生成柔性油茶枝干并替换原来刚性枝条。

3.2.2　设置材料属性

为了提高仿真结果真实性，对刚柔耦合仿真模型材料属性进行设置。激振装置与枝干接触部分材料设置为天然橡胶。参照文献[27]取油茶树枝干密度 1.35 g/cm^3、弹性模量 2 × 10^3 MPa、泊松比 0.2；激振装置末端材料密度 0.92 g/cm^3、弹性模量 2.5 MPa、泊松比 0.45；激振装置其他部分密度 7.85 g/cm^3、弹性模量 2.06 × 10^5 MPa、泊松比 0.31。

3.2.3　添加约束与驱动

设置油茶树主干固定，油茶树主干与大地、激振装置支架与大地、油茶枝与油茶果实之间添加固定副；激振装置支架与光轴之间添加移动副；激振装置与油茶枝干之间添加接触力。

油茶枝干-果实-激振装置刚柔耦合仿真模型如图 4 所示。

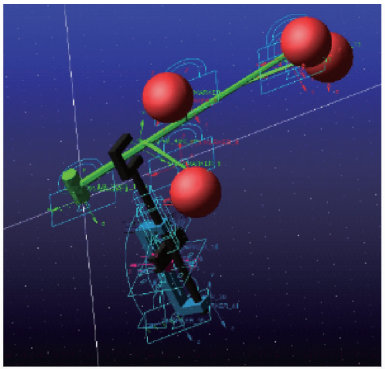


图 4　油茶枝干-果实-激振装置的刚柔耦合仿真模型

Fig. 4　Simulation model of stiff-flexible coupling of *Camellia oleifera* branch - fruit - excitation device

3.3　单因素仿真试验

3.3.1　激振位置

为了探究不同激振位置对油茶果实加速度的影响，设定激振位置为 0 ~ 1 000 mm，间隔 100 mm 进行模拟，结果如图 5 所示。

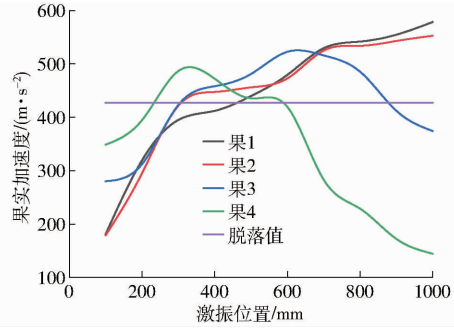


图 5　激振位置对果实加速度的影响曲线

Fig. 5　Curves of effect of excitation position on fruit acceleration

由图 5 可知，不同激振位置对油茶果实的加速度具有一定影响，对不同位置油茶果实加速度响应亦不同。油茶果 4 加速度响应最先突破脱落值，随之果 3、果 2，最后果 1。当激振位置靠近油茶果实时，油茶果实加速度随之增加，随着激振位置逐渐远离油茶果，加速度也随之降低。综合考虑不同位置油茶果加速度响应，当激振位置为 300 ~ 700 mm 时，油茶果综合响应最佳，小于 300 mm 时，油茶果加速度响应较小，不足以使油茶果脱落；当激振位置大于 700 mm 时，油茶果 1、2 加速度响应增长不明显，油茶果 3、4 加速度响应反而降低。

3.3.2　激振频率

为了探究不同激振频率对油茶果实加速度的影响，设定激振频率为 2 ~ 24 Hz，间隔 2 Hz 进行模拟，结果如图 6 所示。

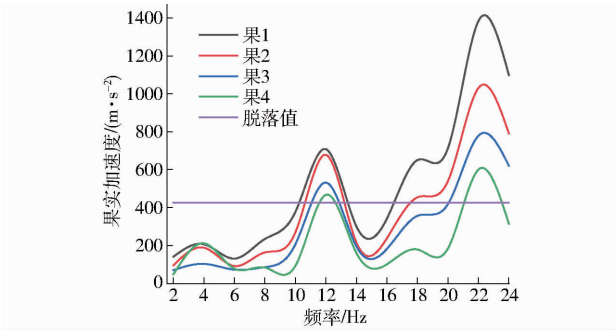


图 6　激振频率对果实加速度的影响曲线

Fig. 6　Curves of effect of excitation frequency on fruit acceleration

由图 6 可知，不同激振频率对油茶果实的加速度具有一定影响，不同位置油茶果实加速度响应趋势基本相同。仿真试验结果显示，油茶果实加速度在此激振频率区间内出现了 3 个明显的峰值区段，第 1 个峰值区段为 2 ~ 6 Hz，果实 2 加速度最大值为 211.55 m/s^2；第 2 个峰值区段为 10 ~ 14 Hz，果实 3 加速度最大值为 709.18 m/s^2；第 3 个峰值区段为 20 ~ 24 Hz，果实 3 加速度最大值为 1 414.81 m/s^2。出现 3 个分支区段的原因为与其枝条固有频率相接近，产生了共振现象。由于频率 2 ~ 6 Hz 的油茶果实加速度响应相对较低，最大加速度响应仅为脱落加速度 0.5 倍，不足以将果实激振脱落；频率 20 ~ 24 Hz 的油茶果加速度响应相对较高，最大加速度响应为脱落加速度 3.31 倍，这时加速度对枝条、花苞有损伤风险；而处于频率段 10 ~ 14 Hz 的油茶果均可脱落，且最大加速度响应仅为脱落加速度 1.66 倍；枝干振动响应适中，既可以保证枝条、花苞不损伤，也可使油茶果实脱落。

3.3.3　激振时间

为了探究不同激振时间对油茶果实加速度的影响，设定激振时间为 2 ~ 12 s，间隔 1 s 进行模拟，结果如图 7 所示。

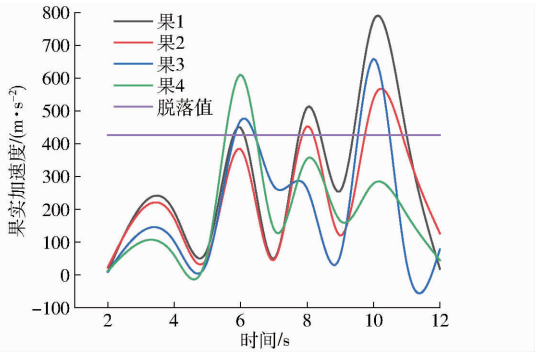


图 7 激振时间对果实加速度的影响曲线

Fig. 7 Curves of effect of excitation time on fruit acceleration

由图 7 可知,不同激振时间对油茶果实加速度具有一定影响,不同位置油茶果实加速度响应趋势基本相同。仿真试验结果显示,油茶果实加速度在此激振时间内出现 4 个明显的峰值区段,第 1 个峰值区段为 2 ~5 s,果实 1 加速度最大值为 229.38 m/s^2,未达到果实脱落加速度;第 2 个峰值区段为 5 ~7 s,果实 4 加速度最大值为 610.66 m/s^2,仅果 2 加速度峰值未达到脱落值,其他 3 个果实均达到脱落值;第 3 个峰值区段为 7 ~9 s,果实 1 加速度最大值为 510.97 m/s^2,果 1、4 加速度峰值达到脱落值,其他 2 个果实均未达到脱落值;第 4 个峰值区段为 9 ~11 s,果实 1 加速度最大值为 790.74 m/s^2,仅果 4 加速度峰值未达到脱落值,其他 3 个果实均达到脱落值。由于时间 2 ~5 s 的油茶果实加速度响应相对较低,不足以将果实激振脱落;然而,激振时间为 6、8、10 s 附近时的油茶果实加速度响应较大,油茶果在惯性力作用下有可能脱落。

4 油茶果采摘机性能试验

4.1 试验条件与材料

试验时间:2023 年 11 月 7—14 日;试验地点:湖南省林业科学研究院油茶基地;试验对象:油茶树龄为 5 ~8 年,枝干直径为 30 ~40 mm 的油茶树;试验仪器与材料:便携激振式油茶果采收机、米尺、计时器、包装袋、手持云台稳定器等。

4.2 试验设计

根据仿真试验结果确定了激振装置工作参数最佳取值。在田间试验时,以激振位置、激振频率、激振时间为试验因素进行三因素三水平的正交试验,共进行 17 组试验。根据单因素结果设计各试验因素编码如表 2 所示。

油茶属于花果同期树种,采摘油茶果时应尽量减少花苞脱落。以油茶果实脱落率 G、油茶花苞脱落率 H 为试验评价指标。计算式为

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Test factors and codes

编码	因素		
	激振位置/mm	激振频率/Hz	激振时间/s
-1	300	10	6
0	500	12	8
1	700	14	10

$$\begin{cases} G = \dfrac{Q_t}{Q_t + Q_w} \times 100\% \\ H = \dfrac{U_t}{U_t + U_w} \times 100\% \end{cases} \tag{27}$$

式中 Q_t——油茶果实脱落数量

Q_w——油茶果实未脱落数量

U_t——油茶花苞脱落数量

U_w——油茶花苞未脱落数量

4.3 试验方法

试验前清理已掉落在地面上的油茶果和花苞。用标签纸标记选定的油茶树枝干以及激振位置。调节激振频率参数,行至作业区域,采摘机末端执行器 U 形夹钩挂油茶树枝干指定位置。启动机器采摘油茶果,一定时间后停止激振。收集并清点油茶果实和花苞脱落数量,以及采摘的油茶树枝干上未脱落的油茶果实与花苞数量。田间试验如图 8 所示。



图 8 田间试验

Fig. 8 Field test

4.4 试验结果与分析

4.4.1 试验结果

便携式枝干振动油茶果采摘田间正交试验结果如表 3 所示,X、Y、Z 为因素编码值。

4.4.2 方差分析与回归方程建立

利用 Design-Expert 13 软件对试验结果进行方差分析,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,油茶果实脱落率回归模型 $P < 0.000\,1$,失拟项 $P = 0.059\,5$,模型决定系数 $R^2 = 0.978\,5$,表明得到的多项式回归方程模型拟合程度较高,拟合效果较好。去除不显著项建立油茶果实脱落率 G 与激振位置 X、激振频率 Y、激振时间 Z 之

表 3　试验结果

Tab. 3　Test results

序号	因素			果实脱落率 G/%	花苞脱落率 H/%
	X	Y	Z		
1	0	0	0	81.25	22.58
2	0	0	0	81.48	22.22
3	1	0	1	83.33	20.83
4	0	1	1	84.62	22.85
5	−1	0	1	83.33	25.00
6	0	−1	1	79.31	22.50
7	0	1	−1	87.50	26.47
8	1	1	0	84.21	25.71
9	1	0	−1	87.50	26.32
10	0	−1	−1	83.33	20.45
11	−1	−1	0	80.95	21.05
12	−1	1	0	87.50	23.68
13	0	0	0	80.95	22.22
14	0	0	0	81.82	21.62
15	1	−1	0	83.33	21.88
16	0	0	0	80.95	22.50
17	−1	0	−1	86.36	20.69

表 4　试验结果方差分析

Tab. 4　Analysis of variance of test results

来源	G		H	
	F	P	F	P
模型	35.33	<0.000 1 **	55.21	<0.000 1 **
X	8.29	0.023 7 *	19.61	0.003 1 **
Y	49.98	0.000 2 **	172.97	<0.000 1 **
Z	161.8	<0.000 1 **	7.95	0.025 8
XY	18.84	0.003 4 **	3.03	0.125 5
XZ	26.23	0.001 4 **	201.84	<0.000 1 **
YZ	4.3	0.076 7	67.56	<0.000 1 **
X^2	34.19	0.000 6 **	8.75	0.021 2 *
Y^2	7.07	0.032 5 *	4.45	0.072 7
Z^2	3.45	0.105 6	8.32	0.023 5 *
失拟项		0.059 5		0.636 8
R^2	0.978 5		0.986 1	

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

间的回归方程模型为

$$G=81.29-0.67X+1.63Y-2.94Z-1.42XY-1.67XZ+1.86X^2+0.85Y^2 \quad (28)$$

由表 4 可知，油茶花苞脱落率回归模型 $P<0.000\,1$，失拟项 $P=0.636\,8$，模型决定系数 $R^2=0.986\,1$，表明得到的多项式回归方程模型拟合程度较高，拟合效果较好。去除不显著项建立油茶花苞脱落率 H 与激振位置 X、激振频率 Y、激振时间 Z 之间的回归方程模型为

$$H=22.23+0.54X+1.6Y-0.34Z-2.45XZ-1.42YZ+0.5X^2+0.48Z^2 \quad (29)$$

4.4.3　响应面分析

由表 4 可知，激振位置 X 和激振频率 Y、激振位置 X 和激振时间 Z 交互作用对油茶果实脱落率 G 显著；激振频率 Y 和激振时间 Z、激振位置 X 和激振时间 Z 交互作用对油茶花苞脱落率 H 显著。因此利用响应面分析法对交互作用显著项进行分析。

（1）对油茶果实脱落率的影响

各因素交互作用下油茶果实脱落率响应曲面分析如图 9 所示。

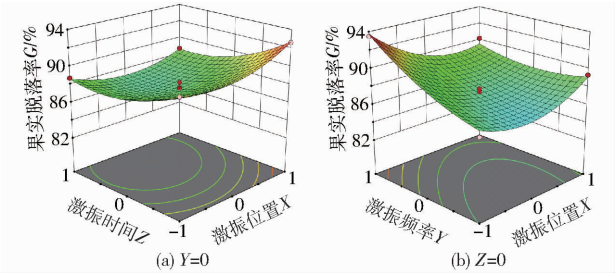


图 9　各因素交互作用下果实脱落率响应曲面

Fig. 9　Fruit abscission response surfaces under interaction of various factors

当激振频率为 12 Hz 时，激振位置和激振时间的交互作用对油茶果实脱落率的影响如图 9a 所示。由图 9a 可知，当激振时间一定时，随着激振位置的增加，油茶果实脱落率呈先降低后上升趋势；激振位置一定时，随着激振时间增加，油茶果实脱落率呈先降低后上升趋势。当激振时间为 6 s、激振位置为 700 mm、激振频率为 12 Hz 时，油茶果脱落率最高。激振位置越高，采摘机激振装置越靠近油茶果实，振动能量在枝条中传递路径越短，枝条阻尼造成的能量损失越低，油茶果实获得越大的振动能量，进而油茶果实惯性力随加速度增大而增大，导致果实脱落率增加。油茶果实脱落率随着激振时间减少和激振位置增加而增高。

当激振时间为 8 s 时，激振频率和激振位置交互作用对油茶果实脱落率的影响如图 9b 所示。由图 9b 可知，当激振频率为 10 ~ 12 Hz 时，随着激振位置增加油茶果实脱落率逐渐降低再升高；当激振频率为 12 ~ 14 Hz 时，油茶果实脱落率与激振位置呈负相关，随着激振位置降低油茶果实脱落率逐渐增加。油茶果实脱落率与激振频率成正比，随着激振频率增大油茶果脱落率随之增加。

（2）对油茶花苞脱落率的影响

各因素交互作用下油茶花苞脱落率响应曲面分析如图 10 所示。

当激振频率为 12 Hz 时，激振位置和激振时间的交互作用对油茶花苞脱落率的影响如图 10a 所示。由图 10a 可知，当激振时间为 6 ~ 8 s 时，油茶花苞脱落率与激振位置呈正相关，激振时间为 8 ~ 10 s 时，油茶花苞脱落率与激振位置呈负相关；当激振位

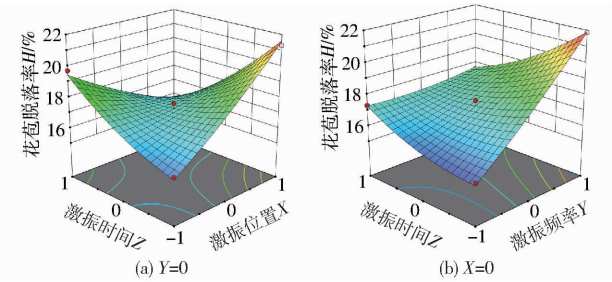


图 10 各因素交互作用下花苞脱落率响应曲面

Fig. 10 Response surfaces of bud shedding under interaction of various factors

置小于 500 mm 时,油茶花苞脱落率与激振时间呈正相关,当激振位置大于 500 mm 时,油茶花苞脱落率与激振时间呈负相关。

当激振位置为 500 mm 时,激振频率和激振时间的交互作用对油茶花苞脱落率的影响如图 10b 所示。由图 10b 可知,当激振频率为 10 ~ 12 Hz 时,油茶花苞脱落率与激振时间呈正相关,随着激振时间增加油茶花苞脱落率逐渐增加;当激振频率为 12 ~ 14 Hz 时,油茶花苞脱落率与激振时间呈负相关,随着激振时间减少油茶花苞脱落率逐渐增加。油茶花苞脱落率与激振频率成正比,随着激振频率增大油茶花苞脱落率随之增加。

4.4.4 参数优化与验证

为获得枝干激振采摘油茶果最优工作参数,利用优化模块进行优化求解。设置目标函数为

$$\begin{cases} \max G(X,Y,Z) \\ \min H(X,Y,Z) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X \leqslant 1 \\ -1 \leqslant Y \leqslant 1 \\ -1 \leqslant Z \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{30}$$

对目标函数优化求解得到油茶果冠层激振采摘最优工作参数组合为:激振位置 300 mm、激振频率 13.44 Hz、激振时间 7.15 s,在此参数组合下油茶果实脱落率 93.86%、花苞脱落率 22.62%。

根据参数优化结果,通过便携式激振采摘机控制器输出优化后工作参数进行田间验证试验,结果如表 5 所示。

由表 5 可知,油茶果实平均脱落率为 91.24%,与优化值相差 2.62 个百分点;花苞平均脱落率为 24.08%,与优化值相差 1.46 个百分点。采摘装备的控制精度导致验证试验的采摘结果略低于优化值。试验过程中油茶果实没有全部脱落的原因有:①果实未完全成熟,同一棵树上的油茶果实存在成熟度不同的现象,成熟度高的油茶果实-果柄的结合力较低,激振脱落所需的惯性力较小,因此容易脱落。②果实大小不一,质量不等。油茶果实受到的惯性力为自身质量与加速度乘积,当外力给予油茶果实的加速度一定时,自身质量越大的油茶果越容易脱落。

表 5 试验试验结果

Tab. 5 Verification test results %

序号	果实脱落率	花苞脱落率
1	91.67	24.14
2	91.43	21.43
3	90.63	26.67
平均值	91.24	24.08

5 结论

(1)分析枝干激振采摘油茶果原理,得出影响油茶树枝干受迫振动的主要因素有激振装置工作参数:激振位置、激振频率和激振时间,以及油茶树物理参数:杨氏模量、枝干转动惯量、密度和横截面积。

(2)建立油茶枝干-果实-激振装置动力学模型,利用动力学软件对其进行单因素仿真,确定田间试验因素:激振位置为 300 ~ 700 mm,激振频率为 6 ~ 10 Hz,激振时间为 6 ~ 10 s。

(3)正交试验结果表明,激振位置和激振时间交互作用对油茶果实脱落率、花苞脱落率均显著。得到最佳参数组合:激振位置 300 mm、激振频率 13.44 Hz、激振时间 7.15 s,此时,油茶果实脱落率 93.86%、花苞脱落率 22.62%。

(4)设最优工作参数激振位置 300 mm、激振频率 13.44 Hz、激振时间 7.15 s 进行田间验证试验,可得油茶果实脱落率为 91.24%,与优化值相差 2.62 个百分点,花苞脱落率为 24.08%,与优化值相差 1.46 个百分点。

参 考 文 献

[1] 伍德林, 杨俊华, 刘芸,等. 我国油茶果采摘装备研究进展与趋势[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(1): 186 - 194.
WU Delin, YANG Junhua, LIU Yun, et al. Research progress and trend of *Camellia oleifera* fruit picking equipment in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(1): 186 - 194. (in Chinese)

[2] 陈永忠. 我国油茶科技进展与未来核心技术[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(7): 1 - 22.
CHEN Yongzhong. Technology progress and future core technology of oil tea in China[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2023, 43(7): 1 - 22. (in Chinese)

[3] 高自成, 李立君, 李昕, 等. 齿梳式油茶果采摘机采摘执行机构的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 19 - 25.

GAO Zicheng, LI Lijun, LI Xin, et al. Development and test of picking actor in oil-tea camellia fruit picking machine of tooth comb type[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 19 – 25. (in Chinese)

[4] 丁达. 高效低损的树冠振动式油茶果采摘装置设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2023.
DING Da. Design and experiment of high efficiency and low loss tree crown vibrating camellia fruit picking device[D]. Hefei: Anhui Agricultural University,2023. (in Chinese)

[5] 苑严伟, 白圣贺, 牛康, 等. 林果机械化采收技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 53 – 63.
YUAN Yanwei, BAI Shenghe, NIU Kang, et al. Research progress on mechanized harvesting technology and equipment for forest fruit[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(9): 53 – 63. (in Chinese)

[6] 郑永军, 江世界, 陈炳太, 等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 1 – 20.
ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):1 – 20. (in Chinese)

[7] 杨欣,姜尊豪,李建平,等.摇枝式加工型苹果采摘振动参数仿真优化与试验[J].农业机械学报,2024,55(5):28 – 39.
YANG Xin, JIANG Zunhao, LI Jianping, et al. Simulation optimization and experiment of vibration parameters of apple picking by shaking branch processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(5):28 – 39. (in Chinese)

[8] 尚书旗, 李成鹏, 何晓宁, 等. 高酸苹果振动式采摘机设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(3):115 – 125,168.
SHANG Shuqi, LI Chengpeng, HE Xiaoning, et al. Design and experiment of high-acid apple vibrating picker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3):115 – 125,168. (in Chinese)

[9] 杜小强, 韩鑫涛, 沈腾飞, 等. 基于 5R 并联机构的二自由度树冠振动装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 96 – 106, 131.
DU Xiaoqiang, HAN Xintao, SHEN Tengfei, et al. Design and experiment of two-degree-of-freedom canopy shaking equipment based on 5R parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(4):96 – 106, 131. (in Chinese)

[10] WU Delin, ZHAO Enlong, JIANG Shan, et al. Influence of excitation position on mechanized picking effect of *Camellia oleifera*[J]. Engenharia Agrícola,2022,42(4): e20220040.

[11] 伍德林, 李超, 曹成茂, 等. 摇枝式油茶果采摘装置作业过程分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 56 – 62.
WU Delin, LI Chao, CAO Chengmao, et al. Analysis and experiment of the operation process of branch-shaking type *Camellia oleifera* fruit picking device[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 56 – 62. (in Chinese)

[12] 罗时挺, 饶洪辉, 张立勇, 等. 齿梳拨刀式油茶果采摘装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(2): 84 – 88,157.
LUO Shiting, RAO Honghui, ZHANG Liyong, et al. Design and experiment of *Camellia oleifera* fruit picking device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(2): 84 – 88,157. (in Chinese)

[13] 伍德林, 傅立强, 曹成茂, 等. 摇枝式油茶果采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 176 – 182,195.
WU Delin, FU Liqiang, CAO Chengmao, et al. Design and experiment of shaking-branch fruit picking machine for camellia fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(11):176 – 182,195. (in Chinese)

[14] COOKE J R, RAND R H. Vibratory fruit harvesting: a nonlinear theory of fruit-stem dynamics[J]. Agriculture of Engineering Res.,1970,15(4): 347 – 363.

[15] COOKE J R, RAND R H. Vibratory fruit harvesting: a linear theory of fruit-stem dynamics[J]. Agriculture of Engineering Res.,1969,14(3): 195 – 209.

[16] 伍德林, 赵恩龙, 姜山, 等. 基于双摆模型的油茶果冠层振动参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 96 – 104.
WU Delin, ZHAO Enlong, JIANG Shan, et al. Optimization analysis and test of canopy vibration arameters of camellia fruit based on double pendulum model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(12):96 – 104. (in Chinese)

[17] 伍德林, 赵恩龙, 姜山, 等. 基于能量传递规律的油茶树冠层振动参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 23 – 33.
WU Delin, ZHAO Enlong, JIANG Shan, et al. Optimization and experiment of canopy vibration parameters of *Camellia oleifera* based on energy transfer characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 23 – 33. (in Chinese)

[18] WU Delin, ZHAO Enlong, FANG Dong, et al. Determination of vibration picking parameters of *Camellia oleifera* fruit based on acceleration and strain response of branches[J]. Agriculture, 2022,12:1222.

[19] LÁNG Z. A one degree of freedom damped fruit tree model[J]. Transactions of the ASABE, 2008,51(3):823 – 829.

[20] GUPTA S K, EHSANI R, KIM N H. Optimization of citrus canopy shaker harvesting system: mechanistic tree damage and fruit detachment models[J]. Transactions of the ASABE, 2016,59(4): 761 – 776.

[21] GUPTA S K, EHSANI R, KIM N H. Optimization of a citrus canopy shaker harvesting system: properties and modeling of tree limbs[J]. Transactions of the ASABE,2015, 58(4): 971 – 985.

[22] 杨会民, 散鋆龙, 陈毅飞, 等. 不同振动特性参数对杏树振动响应的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 10 – 16.

YANG Huimin, SAN Yunlong, CHEN Yifei, et al. Influence of different vibration characteristic parameters on vibration response of apricot trees[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2): 10 - 16. (in Chinese)

[23] WEI Juan, YANG Guangyuan, YAN Hao, et al. Rigid-flexible coupling simulation and experimental vibration analysis of pistachio tree for optimal mechanized harvesting efficiency[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2020, 28(22): 2360 - 2369.

[24] 贺磊盈. 面向振动采收的果树枝干三维重建方法及其动力学特性研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2014.
HE Leiying. Researches on 3D reconstruction of fruit tree's trunk and its dynamic characteristics for vibratory harvesting[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014. (in Chinese)

[25] MORAVČÍK L, VINCÚR R, RÓZOVÁ Z. Analysis of the static behavior of a single tree on a finite element model[J]. Plants, 2021, 10: 1284.

[26] 王芳东. 红壤地区油茶和水稻叶绿素、全氮含量高光谱特征研究[D]. 南昌:江西农业大学,2023.
WANG Fangdong. Hyperspectral characterization of chlorophyll and total nitrogen content of oil tea and rice in red soil area [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University,2023. (in Chinese)

[27] 赵凯杰. 油茶果采摘机构——果树刚柔耦合动力学特性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
ZHAO Kaijie. Study on rigid-flexible coupling dynamic characteristics of camellia fruit picking mechanism[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020. (in Chinese)

(上接第 300 页)

[22] 郭茜. 藤茎类秸秆切割机理与性能试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2016.
GUO Qian. Experimental research on the cutting mechanism and performance of rattan straw[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)

[23] 王庆杰,李洪文,徐迪娟,等. 大垄双行玉米免耕播种技术研究[J]. 干旱地区农业研究,2007(2):17 - 20.
WANG Qingjie, LI Hongwen, XU Dijuan, et al. Study on the technology of the corn no-till planting of one big ridge two rows [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007(2): 17 - 20. (in Chinese)

[24] 朱惠斌,钱诚,白丽珍,等. 正反转动力式玉米切茬防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(1):1 - 11.
ZHU Huibin, QIAN Cheng, BAI Lizhen, et al. Design and experiments of active anti-blocking device with forward-reverse rotation[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(1): 1 - 11. (in Chinese)

[25] 王庆杰,李洪文,何进,等. 螺旋刀型垄台清理装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2010,26(6):109 - 113.
WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment on twist type ridge-clear device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 109 - 113. (in Chinese)

[26] 雷廷宙,沈胜强,吴创之,等. 玉米秸秆干燥特性的试验研究[J]. 太阳能学报,2005,26(2):224 - 227.
LEI Tingzhou, SHEN Shengqiang, WU Chuangzhi, et al. Experimental research on drying characteristics of maize straw[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2005, 26(2): 224 - 227. (in Chinese)

[27] 刘禹辰,张锋伟,宋学锋,等. 基于离散元法玉米秸秆双层粘结模型力学特性研究[J]. 东北农业大学学报,2022,53(1):45 - 54.
LIU Yuchen, ZHANG Fengwei, SONG Xuefeng, et al. Study on mechanical properties for corn straw of double-layer bonding model based on discrete element method[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(1): 45 - 54. (in Chinese)

[28] 王超,刘从京,李洪文,等. 非对称式大小圆盘开沟装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(18):28 - 36.
WANG Chao, LIU Congjing, LI Hongwen, et al. Design and experiment of asymmetric large-small double discs ditching device [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 28 - 36. (in Chinese)

[29] 高振,卢彩云,位旭阳,等. 协拨组合式玉米条带秸秆清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(10):68 - 79.
GAO Zhen, LU Caiyun, WEI Xuyang, et al. Design and experiment of co-stirring combined corn strip the straw cleaning device with coordinated combination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 68 - 79. (in Chinese)

[30] LIU L, WANG X, ZHANG X, et al. Determination and verification of parameters for discrete element modelling of single disc covering of flexible straw with soil[J]. Biosystems Engineering, 2023, 233: 151 - 167.