

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.10.005

涂恒铭, 饶洪辉, 李涛, 等. 轻筒式油茶侧枝夹持振动采摘装置研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(10): 33-38

Tu Hengming, Rao Honghui, Li Tao, et al. Research on vibration picking device for light and simple Camellia oleifera lateral branches [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(10): 33-38

## 轻筒式油茶侧枝夹持振动采摘装置研究\*

涂恒铭<sup>1</sup>, 饶洪辉<sup>1</sup>, 李涛<sup>1</sup>, 童金杰<sup>1, 2</sup>, 王邦进<sup>1</sup>, 刘木华<sup>1</sup>

(1. 江西农业大学现代农业装备重点实验室, 南昌市, 330045;

2. 江西省科学技术信息研究所, 南昌市, 330046)

**摘要:** 针对油茶树成林后立地条件复杂, 采摘机械作业空间小, 中、大型机械化采摘作业难等问题, 基于油茶侧枝水平夹持振动采摘工作原理, 设计一种轻筒式油茶果侧枝夹持振动采摘装置。根据振动装置采摘原理与试验相结合的分析方法, 建立油茶果振动力学模型, 分析对油茶果采摘效果产生影响的主要因素。以树枝直径、激振机构振幅、频率为试验因素, 将油茶果采净率和花苞损伤率作为试验指标, 开展油茶果振动采摘试验。结果表明, 激振机构振动频率对油茶果采净率、花苞损伤率影响均为最显著。当树枝直径为16 mm、激振机构振幅为40 mm、振动频率为16 Hz, 对应的油茶果采净率为85.70%, 花苞损伤率为4.45%, 采摘效果最佳, 基本符合采摘要求。

**关键词:** 油茶果; 振动采摘; 振动力学模型; 侧枝夹持; 轻筒式

中图分类号: S225.93 文献标识码: A 文章编号: 2095-5553 (2024) 10-0033-06

### Research on vibration picking device for light and simple Camellia oleifera lateral branches

Tu Hengming<sup>1</sup>, Rao Honghui<sup>1</sup>, Li Tao<sup>1</sup>, Tong Jinjie<sup>1, 2</sup>, Wang Bangjin<sup>1</sup>, Liu Muhua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, 330045, China;

2. Jiangxi Institute of Science and Technology Information, Nanchang, 330046, China)

**Abstract:** Aiming at the problems such as the complexity of ground conditions after the Camellia oleifera tree forest, the limited space for the picking machinery operation, and the challenges of medium and large-scale mechanized picking, a lightweight and simple Camellia oleifera fruit lateral branch clamping vibration picking device based on the working principle of horizontal clamping vibration picking of the Camellia oleifera lateral branches was designed. The mechanics model for Camellia oleifera fruit vibration was established by analyzing the main factors that affected the effectiveness of Camellia oleifera fruit picking, based on the vibration device picking principle and experimental analysis methods. The experiment tested the Camellia oleifera fruit picking rate and bract damage rate by using branch diameter, amplitude, and frequency of the vibration mechanism as test factors. The results showed that the vibration frequency of the vibration mechanism had the most significant impact on the Camellia oleifera fruit picking rate and bract damage rate. Specifically, when the branch diameter of 16 mm, amplitude of 40 mm, the vibration frequency of 16 Hz, corresponding to the Camellia oleifera fruit picking rate was 85.70%, bud damage rate of 4.45%, which was in line with the picking requirements.

**Keywords:** Camellia oleifera fruit; vibration picking; vibration mechanics model; side branch clamping; light and simple form

## 0 引言

油茶果是我国南方特有的木本使用油料, 被世界

粮农组织优选为健康食用油原料<sup>[1-3]</sup>, 油茶籽产油率约为30%, 油茶种植经济性良好, 也可保护生态环境<sup>[4, 5]</sup>。茶油作为一种健康型食用油, 在国内外具有广阔的发

收稿日期: 2024年1月22日 修回日期: 2024年4月11日

\* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2202104); 国家林业和草原局应急科技项目(2022202); 江西省林业厅科技项目(YCYJZX20220202)

第一作者: 涂恒铭, 男, 1999年生, 江西宜春人, 硕士研究生; 研究方向为现代农业装备。E-mail: 1158355162@qq.com

通讯作者: 童金杰, 女, 1988年生, 湖北南漳人, 硕士, 助理研究员; 研究方向为农业工程与统计分析。E-mail: Tongjj\_1988@163.com

展空间<sup>[6]</sup>。茶油中含有多种有益于人体健康的不饱和脂肪酸以及一些活性和抗氧化成分,具有较好的保健效果<sup>[7-9]</sup>。然而,现有油茶的采摘大部分仍然依靠人工,劳动强度大,亟需可适应现有油茶林的采摘机械。

目前,国内科研院所研制出了一系列油茶果采摘装置。傅立强等<sup>[10]</sup>研制了履带式油茶果采摘机,通过对油茶枝条进行夹持振动实现油茶果采摘,不会对油茶枝造成损伤且采摘效率较高,但机械体积较大,油茶林内难以行进。李赞松等<sup>[11]</sup>研制了手自一体式核桃采摘机,可根据频率信号对振动频率调整,以达到合适振动频率实现较好采摘效果,但整体质量相对较大,人难以长时间工作。闫锋欣等<sup>[12]</sup>研制的手持冲击梳刷式油茶果采摘装置,通过冲击指的碰撞作用和指间梳刷作用采摘油茶果,可有效降低花苞损伤率,但需梳刷多次,采摘效率有待提高。

由以上可知,中、大型油茶果采收装置能够实现较高的采摘效率,且尽量减少花苞损伤;但仍存在通过性较差、爬坡性能较低、可能对油茶树产生损伤等问题。而便携式采摘装置相较于大型采收装置更为轻便,能更好地适应山地丘陵油茶林,但需人工手持作业,难以长时间作业,且限于便携性要求,执行机构所能提供的能量较小,采摘效率不高<sup>[13,14]</sup>。因此,设计一种相对轻便且可稳定长时间作业的油茶果采摘装置,同时能够适应各种种植复杂的油茶林地,对油茶果机械化采摘的大面积推广具有重要意义。

## 1 油茶果生物特性研究与采摘理论分析

### 1.1 油茶果和花苞生物特性研究

振动采摘的基本原理是对油茶树主干或树枝施加激振力,当达到油茶果脱落所需能量时,油茶果由于所受到惯性力大于结合力脱落;同时利用油茶果和花苞的质量和结合力等参数差异较大的特点,在保证大多数油茶果振落时尽量减少花苞脱落,以免影响来年产量。油茶果和花苞分离力以及质量等参数作为影响油茶果脱落的关键因素,对以上参数进行测定,可为油茶果振动采摘装置的设计提供重要参考。

为了获取油茶生物特性参数,在赣州袁州区星火科技园进行了试验,试验对象为长林18号、长林40号和赣无1、赣无2两个系列4个油茶树主栽品种,对油茶果直径、质量,花苞直径、质量以及油茶果和花苞脱落力进行了测定。试验所用设备为ZDF-50数字式拉力计,量程0~50 N,精度±0.01 N。测量过程中样本随机取样,每个品种测量的样本数量为20个,利用拉力计对油茶果和花苞结合力进行测定,并对每个采落的油茶果质量、直径,花苞质量、直径等参数进行记录。

由图1分析可知,油茶果脱落力和花苞脱落力分布范围重叠较小,油茶果和花苞脱落力均值分别为12.54 N和2.96 N,表明油茶果脱落力相较于花苞较大;且油茶果脱落力数据分布偏向于中位线上方,花苞脱落力则相对集中但相对较小。两者脱落力呈正态分布,表明试验数据正常,样本选取较为合理。

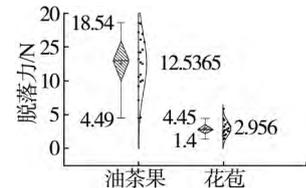


图1 脱落力测定结果

Fig. 1 Measurement results of shedding force

由表1分析可知,油茶果直径和质量均远大于花苞。进而可知,两者在受到激振力作用时,由于质量与体积差异,油茶果所受到的惯性力远大于花苞。因此,在确定合适采摘激振力后,对振动采摘装置进行设计,可以达到振落大部分油茶果且尽量减少花苞脱落的采摘效果。

表1 油茶果和花苞生物特性参数

Tab. 1 Biological characteristics parameters of *Camellia oleifera* fruit and bud

品种	油茶果 质量/g	油茶果 直径/mm	花苞 质量/g	花苞 直径/mm
长林 18号	20.88±7.65	34.60±4.05	0.622±0.06	10.93±0.74
长林 40号	10.86±5.68	25.92±6.61	0.571±0.09	9.78±0.24
赣无1	7.04±2.76	24.02±5.53	0.515±0.04	8.42±0.44
赣无2	14.63±7.17	25.60±8.33	0.552±0.07	8.33±0.51

### 1.2 采摘理论分析

目前,我国机械化振动采摘装置主要有曲柄滑块式结构和大质量偏心块结构两种类型<sup>[15]</sup>,本文所设计采摘装置主要针对山地丘陵条带式油茶林,装置需满足行走灵活好、通过性良好的要求。因此,采摘装置选择曲柄滑块式结构作为激振装置。

由油茶果和花苞脱落力试验可知,油茶果和花苞质量、直径和脱落力差异较大,振动时油茶果所受惯性力也远大于花苞。因此,需对油茶果进行振动采摘受力分析,并结合激振装置原理确定油茶果所需激振力影响因素,进而对振动采摘装置关键部件进行设计。

图2为装置振动时油茶果的受力情况,当油茶果所受惯性力与重力合力大于结合力<sup>[16]</sup>时,油茶果掉落。

由图2分析可知,油茶果脱落条件为

$$F_n + G_n > F_t \quad (1)$$

$$\text{即 } F \sin \theta + G \cos \theta > F_t \quad (2)$$

式中:  $F$ ——惯性力, N;

- $F_n$ ——惯性力法向分力, N;
- $G_n$ ——重力法向分力, N;
- $F_t$ ——油茶果与树枝结合力, N;
- $\theta$ ——重力与结合力夹角补角, rad。

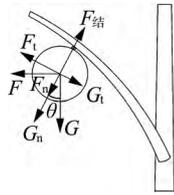


图 2 油茶果受力情况分析

Fig. 2 Stress analysis of Camellia oleifera fruit

油茶果和枝条的振动规律可看作正弦函数<sup>[17]</sup>, 振动产生的水平位移

$$x = A \sin(\omega t + \psi) \cdot e^{\zeta \omega t} \quad (3)$$

式中:  $A$ ——振幅, mm;

$\omega$ ——振动角频率, rad/s;

$t$ ——时间, s;

$\psi$ ——初始相位角, rad;

$\zeta$ ——阻尼比。

对式(3)进行二阶求导运算得

$$x'' = A [\omega^2 - (\zeta \omega)^2] \sin(\omega t + \psi) \cdot e^{\zeta \omega t} \quad (4)$$

由牛顿第二定律可知, 惯性力

$$F = m x'' = m A [\omega^2 - (\zeta \omega)^2] \sin(\omega t + \psi) \cdot e^{\zeta \omega t} \quad (5)$$

$$m \{ A [\omega^2 - (\zeta \omega)^2] \sin(\omega t + \psi) \cdot e^{\zeta \omega t} + g \} > F_t \quad (6)$$

式中:  $m$ ——油茶果质量, kg;

$g$ ——重力加速度, m/s<sup>2</sup>。

由于油茶果质量相对于树枝质量较小, 重力分力较小可近似忽略重力影响, 脱落条件可简化为

$$m A [\omega^2 - (\zeta \omega)^2] \sin(\omega t + \psi) \cdot e^{\zeta \omega t} > F_t \quad (7)$$

由式(7)可知, 油茶果是否脱落与其质量和振动装置所产生的振动频率、振幅有关, 由于本装置对油茶侧枝进行夹持采摘, 因此油茶果质量宏观表现为油茶侧枝整体质量, 而侧枝质量受树枝直径影响, 可知油茶果脱落影响因素为油茶树枝直径和振动装置所产生的振动频率、振幅。

## 2 整机结构和关键部件设计

### 2.1 整机结构与工作原理

采摘装置主要由夹持机构、往复运动机构、采摘杆、棘轮拉紧机构、软轴、手推车架及汽油机等组成, 其基本结构如图 3 所示。其中夹爪安装在往复运动机构的滑动底座上, 棘轮拉紧机构通过钢丝绳皮套控制夹爪的张开与夹紧, 采摘杆顶端与往复运动机构连接, 顶端靠下方铰接在手推车架上, 尾端与软轴连接; 汽油机固定在手推车架上, 并与软轴相连接。

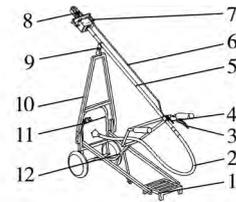


图 3 侧枝夹持式振动采摘装置

Fig. 3 Lateral branch clamping vibration picking device

- 1. 站立架 2. 软轴 3. 油门开关 4. 棘轮机构 5. 采摘杆
- 6. 钢丝绳皮套 7. 往复运动机构 8. 夹爪 9. 万向铰接座
- 10. 支撑架 11. 汽油机 12. 手推车架

采摘过程中, 采摘员将手推车架正对油茶树, 放下手推车架上的搭架, 启动汽油机, 人体站立在搭架上; 手握采摘杆尾端, 根据油茶枝条长势调整采摘头高度, 使夹爪位于二三级侧枝交叉处靠下方位置, 按下棘轮拉紧机构手柄夹紧树枝, 增加汽油机转速直至油茶果开始陆续脱落后稳定转速, 当大部分油茶果振落时, 按下汽油机熄火按键, 完成一次采摘; 松开夹爪后可调整采摘杆继续对附近侧枝进行采摘。

### 2.2 往复运动机构设计

往复运动机构为本装置核心激振机构, 由滑动底座、滑动轴、滑轨、偏心轮、轴套、往复机构外壳等组成, 结构如图 4 所示。轴套与采摘杆相连接, 传动轴将动力传递至偏心轮, 偏心轮匀速转动, 带动所连接的螺纹销让滑轨做往复运动, 滑轨与滑动轴、滑动底座相连接, 滑动底座带动夹爪往复运动, 实现对树枝的往复振动。往复运动机构主要将汽油机输出的能量转化为周期性的往复激振力, 可通过调节汽油机转速以改变振动频率, 而偏心轮上分布有不同偏心距的螺纹孔, 可改变振动装置振幅。

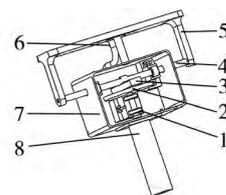


图 4 往复运动机构

Fig. 4 Reciprocating motion mechanism

- 1. 轴 2. 偏心轮 3. 滑轨 4. 滑动轴 5. 滑动底座
- 6. 钢丝绳皮套 7. 往复机构外壳 8. 轴套

由于油茶果侧枝有一定的自由度, 振幅较小时, 难以将激振能量传递到冠层树枝, 油茶果不易脱落; 振幅较大时, 虽然可将油茶果振落, 但可能对树枝产生损伤, 且产生较大振动人操作时难以长时间工作。结合现有文献与预试验结果, 选取 40 mm、50 mm、60 mm 为振幅范围取偏心孔。

### 2.3 夹持机构设计

夹持机构可对油茶枝进行夹紧, 可保证振动时油茶枝随滑动底座一起往复振动, 主要由夹爪块、连杆、中空

销、夹爪座和弹簧、导向销套等组成,结构如图5所示。夹爪片上装有硅胶块,可保护树枝避免受损伤,中空销座通过钢丝绳与棘轮拉紧机构相连接,其在钢丝绳驱动下拉动连杆进而拉动夹爪块进行夹紧;振动采摘完成后,松开棘轮拉紧机构,导向销套上的弹簧回弹,将夹爪张开。

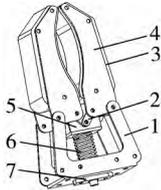


图5 夹持机构结构

Fig. 5 Structure of clamping mechanism

1. 夹爪定臂 2. 连杆 3. 橡胶块 4. 夹爪片  
5. 中空销座 6. 弹簧 7. 导向销套

## 2.4 棘轮拉紧机构设计

棘轮拉紧机构通过钢丝绳皮套实现夹爪对树枝的夹紧,主要由钢丝绳皮套、棘轮棘爪、钢丝绳、定滑轮和固定板等零件构成,如图6所示。通过对手柄的按压,将皮套内的钢丝绳进行拉紧,且由于钢丝绳处在两端固定的钢丝绳皮套内,可实现对夹爪拉紧的同时而不干涉往复运动机构的往复振动;振动采摘完成后,可通过对手柄进行按压,实现对夹爪的松开。

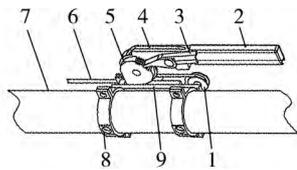


图6 棘轮拉紧机构

Fig. 6 Ratchet tension mechanism

1. 定滑轮 2. 手柄 3. 棘爪 4. 钢丝 5. 棘轮 6. 钢丝绳皮套  
7. 手持杆 8. 固定座 9. 固定板

## 2.5 动力输出机构选型

本装置采用汽油机作为动力源,通过软轴将动力传递至激振装置,动力输出需提供足够能量,激振装置才能将油茶果振落;因此,需对汽油机进行选型。汽油机的主要参数为汽油机功率和转速,所需功率和转速的大小取决于激振装置带动油茶枝振动所需的能量,因此本文结合往复运动机构工作原理进行相关计算。本装置所采用的激振装置可简化为曲柄滑块机构,如图7所示。

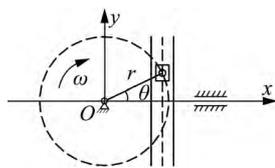


图7 曲柄滑块机构

Fig. 7 Crank slider mechanism

由上文对振动装置振动系统分析可知,油茶果脱落所需激振力

$$F_T = F_c = m_q \omega_0^2 r \quad (8)$$

式中:  $F_c$ ——偏心轮旋转向心力, N;

$m_q$ ——曲柄滑块机构质量, kg;

$\omega_0$ ——偏心轮角速度, rad/s;

$r$ ——偏心距, mm。

偏心轮半径为 20 mm、25 mm、30 mm, 测量得曲柄滑块机构质量为 1.2 kg。

曲柄滑块机构转矩

$$T = m_q r \quad (9)$$

汽油机功率

$$p = K_A \frac{Tn}{9550i} \quad (10)$$

式中:  $i$ ——传动机构减速比;

$K_A$ ——汽油机工况系数;

$n$ ——汽油机转速。

由式(9)得,曲柄滑块机构转矩为 0.36 N·m,汽油机转速  $n$  为 7 500 r/min, 减速比为 17:22, 由于汽油机工作时受到振动冲击影响, 工况系数取 1.4, 计算得汽油机功率 0.52 kW, 考虑传动效率等因素影响, 选取汽油机功率为 0.9 kW, 转速为 7 500 r/min。

## 3 油茶果采摘试验

### 3.1 试验条件

为验证油侧枝夹持式茶果振动采摘装置采摘效果, 于 2023 年 10 月 11 日在江西省新余市分宜县钤山镇山下试验林场开展了户外采摘试验。试验时选择 10 棵树形较好、果实较多、有较多花苞的长林 18 号品种油茶树, 树高 2.5 m 左右, 株距约为 3 m。试验所用的设备主要包括: 侧枝夹持式油茶果振动采摘装置、游标卡尺、卷尺、汽油机转速表。

### 3.2 试验方案

本次试验以夹持树枝直径、执行机构振幅、振动频率作为试验因素, 如表 2 所示。油茶果采净率和花苞损伤率为评价指标, 为了寻找各因素水平最佳参数组合, 开展三因素三水平二次旋转正交试验, 应用 Design-Expert 软件对试验结果进行分析和优化。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Coding of test factors

编码	因素		
	树枝直径/mm	振幅/mm	频率/Hz
-1	15	40	12
0	20	50	14
1	25	60	16

### 3.3 试验结果与分析

试验方案与结果如表 3 所示。其中  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  为因素编码值。

表 3 试验方案与结果  
Tab. 3 Test plan and results

序号	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	油茶果采净率 Y <sub>1</sub> /%	花苞损伤率 Y <sub>2</sub> /%
1	1	1	0	81.25	4.26
2	1	1	0	70.83	5.88
3	1	1	0	86.36	6.67
4	1	1	0	78.26	5.71
5	1	0	1	79.17	3.92
6	1	0	1	73.91	3.57
7	1	0	1	88.46	6.25
8	1	0	1	86.84	5.41
9	0	1	1	76.09	3.23
10	0	1	1	77.27	3.70
11	0	1	1	83.33	4.17
12	0	1	1	89.29	7.41
13	0	0	0	82.35	5.17
14	0	0	0	81.25	4.84
15	0	0	0	82.76	4.88
16	0	0	0	83.87	4.92
17	0	0	0	83.64	4.55

通过 Design—Expert8.0.6 软件对表 3 中试验数据进行多元回归拟合,得到油茶果采摘率、花苞损伤率与各因素的二次多项式回归模型为

$$Y_1 = 82.12 - 3.18X_1 + 2.46X_2 + 5.19X_3 + 0.58X_1X_2 + 0.91X_1X_3 + 1.20X_2X_3 - 1.17X_1^2 - 1.77X_2^2 + 1.15X_3^2 \quad (11)$$

$$Y_2 = 4.96 - 0.0066X_1 + 0.74X_2 + 1.10X_3 - 0.64X_1X_2 - 0.12X_1X_3 + 0.69X_2X_3 + 0.41X_1^2 + 0.25X_2^2 - 0.59X_3^2 \quad (12)$$

对模型 Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 进行方差分析和回归系数显著性检验,结果如表 4 所示。回归模型的拟合度高度显著(模型 P 值小于 0.05);模型失拟项的 P 值大于 0.05,说明回归方程拟合的好,无失拟因素存在,因此可用回归方程 Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 代替试验真实点对采摘试验结果进行分析。根据树枝直径、振幅和振动频率的 P 值大小可判断 3 个试验因素对油茶果采摘率有显著影响,试验因素对油茶果采摘率的影响从大到小依次为振动频率、树枝直径、振幅。模型的校正决定系数 R<sup>2</sup> 分别为 0.942 7、0.962 2,说明模型拟合优度较好,具有较高的可靠性。

对表 4 分析可知,树枝直径和装置振动频率对油茶果采净率均具有极显著影响,装置振幅对油茶果采净率具有显著影响;装置振动频率和振幅对花苞损伤率均具有极显著影响,树枝直径对花苞损伤率影响不显著;其原因是花苞生长位置一般靠近枝条末端,振动能量传递到该位置损耗较大,且花苞所受到惯性力远

小于油茶果,一般不易对花苞产生损伤,树枝直径相差不大时,对花苞损伤率影响较小。各因素对油茶果采净率影响从大到小依次为振动频率、树枝直径、振幅;各因素对花苞损伤率影响从大到小依次为振动频率、振幅、树枝直径。

表 4 回归模型方差分析  
Tab. 4 Analysis of variance of regression model

方差来源	自由度	Y <sub>1</sub>			Y <sub>2</sub>		
		平方和	F	P	平方和	F	P
模型	9	376.97	9.15	0.012 6*	20.15	14.14	<0.01**
X <sub>1</sub>	1	80.65	17.61	<0.01**	0.035	0.22	0.657 5
X <sub>2</sub>	1	48.41	10.57	0.022 7*	4.43	27.95	<0.01**
X <sub>3</sub>	1	215.07	46.97	<0.01**	9.72	61.42	<0.01**
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	1	1.3	0.29	0.611 0	1.66	10.51	0.022 9*
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	1	3.31	0.72	0.433 9	0.060	0.38	0.565 0
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	1	5.71	1.25	0.314 8	1.92	12.12	0.017 6
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	1	5.08	1.11	0.340 6	0.63	3.98	0.102 4
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	1	11.60	2.53	0.172 3	0.24	1.5	0.275 7
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	1	4.86	1.06	0.350 1	1.28	8.1	0.036 0*
残差	5	22.90			0.79		
失拟项	3	21.68	11.85	0.078 8	0.73	7.47	0.120 4
纯误差	2	1.22			0.065		
总和	14	399.87			20.95		

注:\*\*表示影响极显著(P<0.01);\*表示影响显著(P<0.05)。

通过 Design—Expert 软件对目标参数进行优化,以油茶果采摘率取最大值,花苞损伤率取最小值为条件,并结合试验因素的边界条件求解回归模型。通过求解得到采摘装置的最优参数组合为:树枝直径 16.12 mm、振幅 40.59 mm、振动频率 16 Hz,对应的油茶果采净率为 84.92%,花苞损伤率为 4.27%。

### 3.4 试验验证

为了验证回归模型得出的最优参数可靠性,2023 年 10 月 28 日在江西省新余市分宜县钤山镇山下试验林场进行户外采摘验证试验。试验选取树枝直径为 16 mm,调整采摘装置参数为振幅 40 mm、振动频率 16 Hz,采用上述参数进行 3 次重复试验,如表 5 所示。

表 5 验证试验  
Tab. 5 Verification tests %

试验号	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>
1	86.11	3.84
2	85.71	5.17
3	85.29	4.35
平均值	85.70	4.45

由表 5 可知,油茶果采净率的平均值为 85.70%,花苞损伤率的平均值为 4.45%,考虑到验证试验与采摘试验相隔时间较长,油茶果整体成熟度有差异<sup>[18]</sup>,

因此验证试验结果与模型预测结果基本一致。

## 4 结论

1) 设计一种侧枝夹持式振动采摘装置。通过对油茶果及花苞生物力学特性研究,得出油茶果脱落力相较于花苞脱落力较大,基于水平夹持振动采摘工作原理,完成装置的关键部分设计。建立夹持振动系统动力学模型,得出影响油茶果脱落所需激振力的主要因素为树枝直径、激振机构振幅、频率。

2) 对油茶主栽品种长林18号等4个品种油茶果和花苞生物特性进行测定,得出油茶果脱落力和花苞脱落力集中区间分别为4.49~18.54 N和1.4~4.45 N,均值分别为12.54 N和2.96 N,表明油茶果脱落力相较于花苞较大。因此,在确定合适采摘激振力后,对振动采摘装置进行设计,可以达到振落大部分油茶果且尽量减少花苞脱落的采摘效果。

3) 通过油茶采摘试验,得到油茶果采净率和花苞损伤率二次多项式回归模型通过方差分析可得出执行机构振动频率对采摘评价指标影响最大。通过参数优化和试验验证可知,当树枝直径为16.12 mm、振幅为40.59 mm、振动频率为16 Hz时,油茶果采净率为84.92%,花苞损伤率为4.27%。

## 参 考 文 献

[1] 何方,姚小华. 中国油茶栽培[M]. 北京:中国林业出版社,2013.

[2] 赵家宏. 茶油的保健功能及开发前景[J]. 云南林业, 2011(4): 58.

[3] 易雪平,段鹏飞,何守峰,等. 木本食用油料植物资源及其籽油的研究现状[J]. 中国野生植物资源, 2017, 36(3): 62-69, 73.  
Yi Xueping, Duan Pengfei, He Shoufeng, et al. Research status of woody edible oil plant resources and its seed oil [J]. China Wild Plant Resources, 2017, 36(3): 62-69, 73.

[4] 虞德森. 油茶种植现状及高产栽培技术探讨[J]. 智慧农业导刊, 2023, 3(14): 64-67.

[5] 曾永明,黄小芮,栾洁,等. 广西地区油茶籽营养成分研究[J]. 轻工科技, 2023, 39(6): 27-30.

[6] 梅阿军. 油茶种植现状及高产栽培技术分析[J]. 种子科技, 2022, 40(17): 124-126.

[7] 吴静,顾震,谢传奇,等. 油茶果壳多糖纯化工艺及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业, 2023, 44(11): 72-76.  
Wu Jing, Gu Zhen, Xie Chuanqi, et al. Study on the extraction process and antioxidant activity of polysaccharide from *Camellia oleifera* fruit shell [J]. The Food Industry, 2023, 44(11): 72-76.

[8] 杨钧钰,杨丽琼,候小青,等. 资源县油茶产业发展现状及对策[J]. 园艺与种苗, 2021, 41(8): 51-53.

[9] 于巍巍,杨英杰,颜晓琦,等. 油茶果提取物抗肿瘤作用研究进展[J]. 赣南医学院学报, 2020, 40(1): 30-33.

[10] 傅立强. 履带式油茶果机械采摘整机设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2020.

[11] 李赞松,曹成茂,伍德林,等. 手自一体式山核桃采摘机的设计与试验[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(7): 1309-1319.  
Li Zansong, Cao Chengmao, Wu Delin, et al. Design and experiment of hand-operated self-integrated picking machine for *Carya cathayensis* [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2019, 33(7): 1309-1319.

[12] 闫锋欣,李许杰,杨永霞,等. 手持冲击梳刷式油茶果采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 129-140.  
Yan Fengxin, Li Xuji, Yang Yongxia, et al. Design and experiment of hand-held impacting comb-type *Camellia oleifera* fruit harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 129-140.

[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, 2019, 51(11): 176-182, 195.

[14] 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.

[15] 靳文婷,赵金辉,庄腾飞,等. 林果机械振动采摘理论与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2023, 54(S1): 144-160.  
Jin Wenting, Zhao Jinhui, Zhuang Tengfei, et al. Review on theory and equipment of mechanical vibration picking of forest fruits [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S1): 144-160.

[16] 林乐鹏. 面向林果振动采收的电子果实设计与研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2017.

[17] 刘英,范开欣,马晨伟. 枸杞采收机振动采收机理分析[J]. 林业机械与木工设备, 2023, 51(10): 39-43.  
Liu Ying, Fan Kaixin, Ma Chenwei. Theoretical analysis of vibration of self-propelled wolfberry picker [J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2023, 51(10): 39-43.

[18] Mo Xiaoqin, Zhang Zhen, Chen Yongzhong, et al. Effects of different picking time and different geographical provenances on oil content of *Camellia oleifera* [J]. Asian Agricultural Research, 2018, 10(10): 97-101.