doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.010

基于双摆模型的油茶果冠层振动参数优化与试验

伍德林　赵恩龙　姜　山　丁　达　刘洋洋　刘　路
(安徽农业大学工学院, 合肥 230036)

摘要: 为研究振动参数对油茶果采摘的影响,本文建立了油茶“果实-枝条”双摆动力学模型,通过求解动力学模型得出系统固有频率为 0.42、7.18 Hz;根据对油茶果实和花苞受力分析,得出油茶果实和花苞振动脱落所需的平均加速度分别为 427.15、1 936 m/s^2;利用 ADAMS 动力学仿真软件对油茶果冠层振动采摘进行了仿真试验,利用 Design-Expert 11.0.4 软件对试验数据进行分析和优化并进行田间试验验证,理论优化结果为振动时间 8.09 s、振动频率 8.15 Hz、振幅 50 mm 时,油茶果实采收率为 93.41%,油茶花苞损伤率为 14.10%。田间试验结果表明,针对湘林 210 品种油茶树,当冠层振动时间 8 s、振动频率 8 Hz、振幅 50 mm 时,油茶果实采收率和花苞损伤率平均值分别为 92.37%、14.38%,与理论优化值的差值分别为 1.04、0.28 个百分点。

关键词: 油茶果; 振动采摘; 双摆模型; 参数优化
中图分类号: S225.93　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)12-0096-09　　**OSID**:

Optimization Analysis and Test of Canopy Vibration Parameters of Camellia Fruit Based on Double Pendulum Model

WU Delin　ZHAO Enlong　JIANG Shan　DING Da　LIU Yangyang　LIU Lu
(*School of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*)

Abstract: Mechanized picking of camellia fruit mainly uses vibration. In order to study the effect of canopy vibration parameters on the picking of *Camellia oleifera*, a camellia “fruit - branch” double pendulum dynamic model was established, the natural frequencies of the system were 0.42 Hz and 7.18 Hz by solving the dynamic model. According to the force analysis of the fruit and flower buds of the camellia, the average acceleration of the fruit and flower bud shedding of the camellia was 427.15 m/s^2 and 1 936 m/s^2, respectively; ADAMS dynamic simulation software was used to simulate the vibration picking of camellia fruit canopy. The variance and response surface analysis of the test data were carried out by using Design-Expert 11.0.4 software, and the quadratic regression models of oil camellia fruit recovery and flower bud damage rate with vibration time, vibration frequency and amplitude were established. By calculating the contribution rate of test factors to test indexes and optimizing canopy vibration parameters, the optimal theoretical value was obtained as follows: vibration time of 8.09 s, vibration frequency of 8.15 Hz, amplitude of 50 mm, oil camellia fruit recovery rate was 93.41% and oil camellia flower bud damage rate was 14.10%, which were verified by field tests. Results showed that under the parameter combination of vibration time was 8 s, vibration frequency was 8 Hz and amplitude was 50 mm, the average value of XIANG - LIN 210 camellia fruit recovery rate and bud damage rate were 92.37% and 14.38%, the difference with the theoretical optimal value was 1.04 and 0.28 percentage points, respectively. The experimental results can provide theoretical basis for the design of camellia fruit picking equipment.

Key words: *Camellia oleifera* fruit; vibration harvesting; double pendulum model; parameter optimization

收稿日期: 2021-09-06　修回日期: 2021-10-23
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0702105)
作者简介: 伍德林(1970—),男,副教授,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: wudelin@126.com

0　引言

我国油茶种植面积已达 4.53 × 10^6 hm^2，茶油产量 627 000 t，油茶产业有效带动近 200 万贫困人口脱贫增收[1]。近年来，我国油茶产业发展迅速，但是配套的收获设备没能跟上其发展，油茶果采摘完全依靠人工，作业效率低，成本高，成为油茶产业持续发展的瓶颈[2-5]。因此，应采用机械化作业以解决阻碍油茶产业持续发展的难题。

利用振动方式对林果进行机械化收获作业是提高整个林果生产率的有效手段之一[6-7]，国内外已对林果收获的振动参数与收获效果进行了相关研究[8-13]。UPADHYYAYA 等[14]利用单摆模型对果-柄系统进行了振动模态与分析；RAND 等[15]通过双摆模型对“枝-果-柄”间的耦合振动关系进行了研究；LÁNG[16-18]建立了单自由度樱桃树模型，在振动激励后对樱桃树的响应状态进行了系统的建模与分析，结果表明樱桃振动收获与周期性水平和垂直平面位移有关。CASTRO-GARCÍA 等[19]对不同振动频率、振动时间和振动次数等参数对松子机械化收获的影响进行了研究，在保证果树枝条和树皮所受损伤最小的情况下，获得了最佳的收获效率。ARISTIZÁBAL 等[20]研究振动频率、振幅、振动时间以及振动激励位置对成熟咖啡果实采收率的影响。伍德林等[21-22]建立油茶果振动脱落模型并求解，得出影响油茶果脱落的主要因素为振幅、频率、作用时间和夹持位置，并设计了摇枝式油茶果采摘装置，通过田间试验得到最优油茶振动收获参数组合。散鋆龙等[23]为研究果实脱落的运动状态，建立了三自由度的果实-枝条双摆系统，分析果实在空间运动的轨迹接近椭圆形。

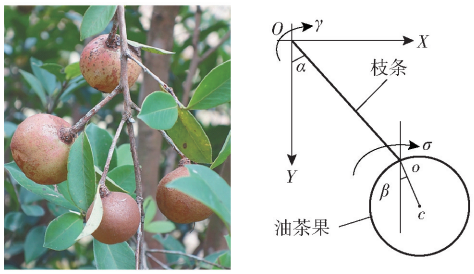
综上所述，国内外针对林果的收获已提出了单摆、双摆等数学模型并通过试验得到了相应最优振动参数，但针对油茶树冠层振动采摘的研究主要集中在激振装置的设计和优化。本文以湘林 210 品种油茶为研究对象，建立油茶“果实-枝条”双摆动力学模型，对动力学模型进行求解并分析油茶果实、花苞脱落条件。通过 ADAMS 软件对油茶果冠层振动采摘进行仿真，采用 Design-Expert 11.0.4 软件对试验数据进行优化；通过田间试验对理论分析结果加以验证，以期得到油茶果冠层振动参数最优组合。

1　油茶“果实-枝条”双摆动力学模型

目前对油茶果振动采收产生影响的振动参数主要有振动时间、振动频率和振幅[24]。针对湘林 210 油茶树实际生长状况建立油茶“果实-枝条”双摆模型，对其固有频率进行理论分析。

1.1　双摆动力学模型建立

油茶属于花果同期作物，且实际生长情况相对特殊，果实生长方向随机，主要生长形式以果实垂吊生长在单独的细枝上，如图 1a 所示，受迫振动时随枝条运动。在动力学研究中，由于油茶果柄长度在 3 ~ 5 mm 之间，可视其为无柄果实[8]。将其简化为油茶“果实-枝条”双摆模型，如图 1b 所示。



(a) 油茶果生长状态　　(b) 简化模型

图 1　油茶“果实-枝条”双摆动力学模型

Fig. 1　“Fruit - branch” double pendulum dynamic model of *Camellia oleifera*

油茶“果实-枝条”双摆动力学模型系统受迫振动过程中主要有 4 种运动方式：枝条相对主枝摆动和扭转运动、果实相对枝条摆动和扭转运动[22]。若忽略果柄和空气阻力的影响，将枝条视为刚性杆，将油茶果柄和果实视为质心为 c 的实心球体。分别以油茶枝条和主枝、果柄和枝条的连接处为原点建立具有 4 个自由度的双摆动力学模型，简化后双摆动力学模型如图 1b 所示。

拉格朗日方程为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}_i}\right)-\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{q}_i}+\frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{q}_i}+\frac{\partial V}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}_i}=\boldsymbol{Q}_i \tag{1}$$

其中

$$\boldsymbol{q}_i=(\alpha,\beta,\gamma,\sigma)$$

$$\dot{\boldsymbol{q}}_i=(\dot{\alpha},\dot{\beta},\dot{\gamma},\dot{\sigma})$$

$$\boldsymbol{Q}_i=(Q_\alpha,Q_\beta,Q_\gamma,Q_\sigma)$$

式中　T——动能，J　　U——势能，J

V——瑞利耗散函数　　$\boldsymbol{q}_i$——广义坐标

$\dot{\boldsymbol{q}}_i$——广义速度，m/s

$\boldsymbol{Q}_i$——外力，N

α——枝条与垂直方向的夹角，rad

β——果实质心与垂直方向的夹角，rad

γ——果实与枝条扭转的夹角，rad

σ——枝条与主枝扭转的夹角，rad

$\dot{\alpha}$——枝条相对垂直方向的角速度，rad/s

$\dot{\beta}$——果实相对垂直方向的角速度，rad/s

$\dot{\gamma}$——果实相对枝条扭转的角速度，rad/s

$\dot{\sigma}$——枝条相对主枝扭转的角速度，rad/s

Q_α、Q_β、Q_σ、Q_γ——模型所受外力，N

油茶“果实-枝条”双摆动力学模型系统的总动能为

$$T=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{3}m+M\right)l^2\dot{\alpha}^2+\frac{7}{10}MR^2(\dot{\beta}^2+\dot{\gamma}^2)+\frac{1}{4}mr^2\dot{\sigma}^2+MlR\dot{\alpha}\dot{\beta}\cos(\alpha-\beta) \tag{2}$$

式中 m——枝条质量,kg

M——果实质量,kg

l——枝条长度,mm

R——果实半径,mm

r——枝条半径,mm

油茶“果实-枝条”双摆动力学模型系统由弹性挠度和重力所产生的势能为

$$U=\frac{1}{2}K_1\sigma^2+\frac{1}{2}K_2(\alpha-\beta)^2+\frac{1}{2}K_3\alpha^2+\frac{1}{2}K_4\gamma^2-\frac{1}{2}mgl\cos\alpha-M(l\cos\alpha+R\cos\beta) \tag{3}$$

式中 g——重力加速度,取 9.8 m/s^2

K_1——枝条弹性系数,为常数

K_2——枝条与果实连接处弹性系数,为常数

K_3——果实与枝条间扭转弹性系数,为常数

K_4——枝条与主枝间扭转弹性系数,为常数

油茶“果实-枝条”双摆动力学模型系统的瑞利耗散函数为

$$V=\frac{1}{2}C_1\dot{\sigma}^2+\frac{1}{2}C_2(\dot{\alpha}-\dot{\beta})^2+\frac{1}{2}C_3\dot{\alpha}^2+\frac{1}{2}C_4\dot{\gamma}^2 \tag{4}$$

式中 C_1——枝条粘性阻尼系数,为常数

C_2——枝条与果实连接粘性阻尼系数,为常数

C_3——果实与枝条扭转粘性阻尼系数,为常数

C_4——枝条与主枝扭转粘性阻尼系数,为常数

将式(2)~(4)代入式(1)可得油茶“果实-枝条”双摆动力学模型系统在振动过程中的动力学微分方程组为

$$\begin{cases}Q_\alpha=\left(\frac{1}{3}m+M\right)l^2\ddot{\alpha}+MlR\ddot{\beta}\cos(\alpha-\beta)+MlR\dot{\beta}^2\sin(\alpha-\beta)+K_3\alpha+K_2(\alpha-\beta)+C_2(\dot{\alpha}-\dot{\beta})+C_3\dot{\alpha}+\left(\frac{1}{2}m+M\right)gl\sin\alpha\\ Q_\beta=\frac{7}{5}MR^2\ddot{\beta}+MlR\ddot{\alpha}\cos(\alpha-\beta)-MgR\dot{\alpha}^2\sin(\alpha-\beta)-K_2(\alpha-\beta)+MgR\sin\beta-C_2(\dot{\alpha}-\dot{\beta})\\ Q_\sigma=\frac{1}{2}mr^2\ddot{\sigma}+K_1\sigma+C_1\sigma\\ Q_\gamma=\frac{7}{5}MR^2\ddot{\gamma}+K_4\gamma+C_4\gamma\end{cases} \tag{5}$$

式中 $\ddot{\alpha}$——枝条相对垂直方向的角加速度,rad/s^2

$\ddot{\beta}$——果实相对垂直方向的角加速度,rad/s^2

$\ddot{\gamma}$——果实相对枝条扭转的角加速度,rad/s^2

$\ddot{\sigma}$——枝条相对主枝扭转的角加速度,rad/s^2

1.2 双摆动力学模型求解

由于油茶树冠层振动过程中,主要是振幅和振动频率的变化,当双摆在微幅振动过程中,α、β 的角度变化很小,所以 α 与 β 的差值趋近于零[25],即

$$\begin{cases}\sin\alpha\approx\alpha\\ \sin\beta\approx\beta\\ \sin(\alpha-\beta)=0\\ \cos(\alpha-\beta)=1\end{cases} \tag{6}$$

若不考虑枝条和果实扭转运动,只考虑其平面运动,忽略粘性阻尼系数和弹性系数,将式(6)代入式(5)化简可得

$$\begin{cases}Q_\alpha=\left(\frac{1}{3}m+M\right)l^2\ddot{\alpha}+MlR\ddot{\beta}+\left(\frac{1}{2}m+M\right)gl\alpha\\ Q_\beta=\frac{7}{5}MR^2\ddot{\beta}+MlR\ddot{\alpha}+MgR\beta\end{cases} \tag{7}$$

当外力为零时,将式(7)写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix}\left(\frac{1}{3}m+M\right)l^2 & MlR\\ MlR & \frac{7}{5}MR^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{\alpha}\\ \ddot{\beta}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\left(\frac{1}{2}m+M\right)gl & 0\\ 0 & MgR\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\end{bmatrix}=0 \tag{8}$$

若式(8)存在非零解,则特征矩阵的行列式为零,即

$$\begin{vmatrix}\left(\frac{1}{2}m+M\right)gl-\left(\frac{1}{3}m+M\right)l^2\omega_0^2 & -MlR\omega_0^2\\ -MlR\omega_0^2 & MgR-\frac{7}{5}MR^2\omega_0^2\end{vmatrix}=0 \tag{9}$$

式中 ω_0^2——方程的特征值

化简得

$$\frac{2}{5}MlR\omega_0^4+\left[\left(\frac{1}{2}m+M\right)g^2+\frac{7}{15}mlR\right]-\left(\frac{1}{3}ml+Ml+\frac{7}{10}mR+\frac{7}{5}MR\right)g\omega_0^2=0 \tag{10}$$

则频率为

$$f=\frac{\omega}{2\pi} \tag{11}$$

式中 f——系统固有频率,Hz

ω——系统摆动角速度,rad/s

以湘林 210 油茶为试验对象,每组选 20 个样本,共进行 3 组试验。通过试验测得油茶果实质量

在 25.8 ~ 62.6 g，平均值为 44.2 g，枝条质量在 13.5 ~ 26.7 g，平均值为 20.1 g，油茶果半径在 16.4 ~ 25.2 mm，平均值为 20.8 mm，油茶枝条长度在 10.3 ~ 30.7 mm，平均值为 20.5 mm。

将上述参数平均值代入式(10)、(11)，可得油茶果实-枝条振动系统的固有频率为 0.42、7.18 Hz。

1.3　油茶果实和花苞脱落形式与条件

油茶树冠层振动采摘作业过程中，油茶果实、花苞脱落的形式主要以果实-枝条、花苞-枝条连接处分离脱落为主，且随着油茶果实和花苞成熟度的增加，果实和花苞更容易挣脱“果实-枝条”、“花苞-枝条”结合力而脱落[26]。油茶果实、花苞能否成功脱落取决于振动装置施加的振动能量传递到果实、花苞处时油茶果实、花苞所产生的惯性力，即油茶果实、花苞的惯性力越大越容易脱落。油茶果实受力分析如图 2 所示。

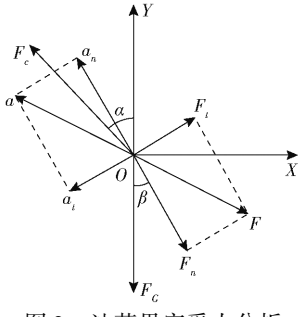


图 2　油茶果实受力分析

Fig. 2　Stress analysis of *Camellia oleifera* fruit

油茶果实受迫振动所产生的惯性力 F，可分解为法向拉应力和切向切应力，即

$$\begin{cases} F_t = Ma_t \\ F_n = Ma_n \end{cases} \tag{12}$$

式中　F_t——切向切应力，N

F_n——法向拉应力，N

a_n——法向加速度，m/s^2

a_t——切向加速度，m/s^2

对油茶果实受力分析可知：当“果实-枝条”间的结合力 F_c 沿法向加速度 a_n 方向的分力小于果实产生的惯性力 F 的法向分力 F_n 与果实重力 F_G 法向分力的合力，油茶果实-枝条间的结合力 F_c 沿切向加速度 a_t 方向的分力小于果实产生的惯性力 F 的切向分力 F_t 与果实重力 F_G 法向分力的合力时，油茶果实发生脱落，即

$$\begin{cases} F_t = F_c\sin(\alpha-\beta) - F_G\sin\beta \\ F_n = F_c\cos(\alpha-\beta) - F_G\cos\beta \end{cases} \tag{13}$$

实际振动收获过程中，α 与 β 的差值趋近于零。忽略果实重力的影响，将式(6)、(12)代入式(13)，整理简化得

$$\begin{cases} Ma_t \geqslant 0 \\ Ma_n \geqslant F_c \end{cases} \tag{14}$$

由此可知，油茶果实脱落加速度条件为

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_t^2} \geqslant \frac{F_c}{M} \tag{15}$$

式中　a——脱落加速度，m/s^2

成熟期的湘林 210 油茶果实-枝条之间的平均抗拉应力为 18.88 N[24]；油茶花苞平均抗拉应力为 9.68 N，花苞平均质量为 5 g。由此计算油茶果实和花苞脱落时加速度为 427.15、1 936 m/s^2。

2　油茶果冠层振动脱落仿真试验

为了验证理论分析的正确性，本文选取一棵 6 年生、生长良好的湘林 210 品种油茶树为对象，以项目组研制的树冠激振式油茶果采收机为激振装置，利用 SolidWorks 软件对其三维建模。采用 ADAMS 运动仿真软件对油茶果振动采摘过程进行刚柔耦合仿真试验。

2.1　仿真试验方案

选择油茶树冠层的振动时间、振动频率和激励点振幅为试验因素，油茶果实采收率 G 和油茶花苞损伤率 H 为评价指标。利用 Design-Expert 11.0.4 软件进行试验方案设计，共进行 17 组试验，每组选择油茶树冠层 3 个不同区域进行试验，试验结果取 3 个不同区域的平均值。根据双摆模型求解结果以及课题组前期研究成果[25]。针对适采期的湘林 210 品种油茶适当选定各试验因素水平编码如表 1 所示。

表 1　试验因素编码

Tab. 1　Test factors and coding

编码	因素		
	振动时间 a/s	振动频率 b/Hz	振幅 c/mm
-1	5	5	30
0	10	7	40
1	15	9	50

由于油茶果实和花苞在振动过程中会产生一个使其脱落的加速度，所以本文采用在 ADAMS 后处理中查看油茶果质心加速度的方式判定油茶果实和花苞的脱落情况。根据油茶果实、花苞的受力分析结果，当油茶果实质心加速度大于 427.15 m/s^2 时，表示油茶果实脱落，当油茶花苞质心加速度大于 1 936 m/s^2 时，表示油茶花苞脱落。

2.2　仿真模型建立

仿真模型主要由树冠激振式油茶果采收机、油茶树、油茶果实和花苞 4 部分组成，为了简化模型提高仿真效率，油茶果实和花苞模型规格相同，取上述

试验平均值。“树冠激振式油茶果采收机”三维模型只包括与油茶树接触的激振装置结构。

为了保证仿真验证的准确性,仿真试验的材料属性尽量接近真实情况。由于油茶果实和花苞的材料属性对仿真试验结果几乎没有影响,所以本文只对油茶树树体进行柔性建模[27]。仿真模型如图 3 所示。

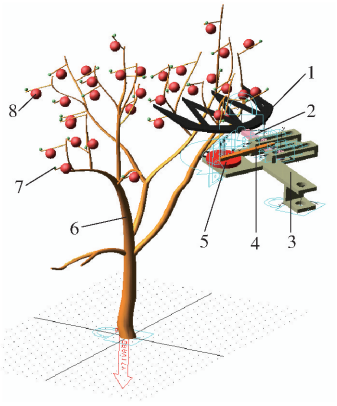


图 3 仿真模型

Fig. 3 Simulation model

1. 夹持盘 2. 滑杆 3. 支架 4. 连杆 5. 偏心圆盘 6. 油茶树 7. 油茶花苞 8. 油茶果实

油茶树体柔性化建模。本文仿真采用 ADAMS/AUTOFLEX 模块直接建立柔性体的方法,将 SolidWorks 软件对油茶树和树冠激振装置建立的三维模型导入到 ADAMS 动力学仿真软件中,选中油茶树建立柔性体并替换原来的刚性体。

设置材料属性。湘林 210 油茶树的弹性模量为 2×10^3 MPa,密度为 1.35 g/cm^3,泊松比为 0.2[28];激振装置的零件材料属性设置为钢,弹性模量为 2.06×10^5 MPa,密度为 7.85 g/cm^3,泊松比为 0.31。

添加约束。根据激振装置的机械结构,支架和油茶树相对于大地添加固定副,滑动杆与卡夹板之间添加固定副;偏心盘与支架和连杆、连杆与滑动杆之间添加转动副;滑动杆与支架之间添加移动副;卡持盘与油茶树之间添加接触。

施加驱动。根据激振装置的工作原理,在偏心盘和支架之间的转动副上施加旋转驱动。

3 仿真试验结果与分析

3.1 试验结果

仿真试验方案与结果如表 2 所示,A、B、C 为因素编码。利用 Design-Expert 11.0.4 软件对油茶果冠层振动采摘仿真试验结果进行方差分析,结果如表 3 所示。

根据油茶果实采收率 G 的试验数据分析结果可知,该模型 $P<0.0001$,说明以油茶果实采收率 G 作为响应函数的回归模型具有高度的显著性,失拟项 $P=0.4565>0.05$ 不显著,说明模型较为稳定,回归方程拟合较好。剔除不显著项建立油茶果实采收率 G 与油茶树冠层的振动时间 A、振动频率 B、振幅 C 之间的二次多项式响应回归模型为

$$G=92.63-0.74A+0.78B+0.58C-1.05AC-3\,024A^2-1.51B^2 \quad (16)$$

根据油茶花苞损伤率 H 的试验数据分析结果可知,该模型 $P=0.0034$,说明以油茶花苞损伤率 H 作为响应函数的回归模型具有高度的显著性,失拟项 $P=0.8346>0.05$ 不显著,说明模型较为稳定,回归方程拟合较好。剔除不显著项建立油茶花苞损

表 2 试验设计方案与结果

Tab. 2 Experimental design scheme and results

序号	因素			评价指标	
	A	B	C	G/%	H/%
1	0	0	0	93.12	14.99
2	−1	0	1	91.54	13.83
3	0	0	0	92.84	14.12
4	1	1	0	88.13	12.52
5	1	0	1	87.85	13.55
6	0	0	0	92.55	13.48
7	0	−1	−1	89.72	13.01
8	−1	−1	0	87.73	15.42
9	1	0	−1	89.28	11.06
10	0	0	0	92.75	14.78
11	0	1	1	92.72	13.28
12	0	0	0	91.95	14.67
13	−1	1	0	89.43	12.99
14	−1	0	−1	88.78	14.37
15	0	1	−1	90.83	12.25
16	1	−1	0	86.28	11.98
17	0	−1	1	91.15	15.25

表 3 试验结果方差分析

Tab. 3 Analysis of variance of test results

变异来源	果实采收率 G		花苞损伤率 H	
	F	P	F	P
模型	41.12	<0.0001 **	9.68	0.0034 **
A	22.36	0.0021 **	27.21	0.0012 **
B	24.60	0.0016 **	10.33	0.0148 *
C	13.70	0.0076 **	13.18	0.0084 **
AB	0.029	0.8707	8.53	0.0223 *
AC	22.26	0.0022 **	8.88	0.0205 *
BC	0.268	0.6205	1.42	0.2728
A^2	225	<0.0001 **	8.28	0.0237 *
B^2	48.26	0.0002 **	3.57	0.1009
C^2	0.024	0.8814	3.96	0.0870
失拟项	1.07	0.4565	0.285	0.8346

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

伤率 H 与油茶树冠层的振动时间 A、振动频率 B、振幅 C 之间的二次多项式响应回归模型为

$$H = 13.98 - 0.94A - 0.58B + 0.65C + 0.74AB + 0.76AC - 0.77A^2 \quad (17)$$

3.2　贡献率分析

贡献率可以反映单个因素对所建立模型的影响程度。贡献率越大，影响程度越大。贡献率 Δ_j 计算公式为

$$\Delta_j = \delta_j + \frac{1}{2}\sum_{\substack{i=1\\ i\neq j}}^{X}(\delta_{ij} + \delta_{ji}) \quad (j = 1,2,3) \quad (18)$$

参考值 δ 为

$$\delta = \begin{cases} 0 & (F \leqslant 1) \\ 1 - \dfrac{1}{F} & (F > 1) \end{cases} \quad (19)$$

式中　δ_j——第 j 个参数一次项的贡献率

δ_{jj}——第 j 个参数二次项的贡献率

δ_{ij}——第 j 个参数与其他参数交互作用的贡献率

根据方差分析的 F 值，通过式(18)、(19)计算油茶树冠层各振动参数对不同评价指标的贡献率如表 4 所示。

表 4　各因素对不同指标贡献率

Tab. 4　Contribution rates of various factors to different indicators

因素	贡献率	
	果实采收率 G	花苞损伤率 H
振动时间 A	2.43	2.73
振动频率 B	1.94	2.21
振幅 C	1.40	2.26

由表 4 可知，油茶树冠层振动参数对油茶果实采收率的贡献率从大到小的顺序为：振动时间、振动频率和振幅；油茶树冠层振动参数对油茶花苞损伤率的贡献率从大到小的顺序为：振动时间、振幅和振动频率。

3.3　响应曲面分析

为更直观分析各试验因素对评价指标的影响，固定一个试验因素处于零水平，研究其余两个因素之间的交互作用响应，得到油茶树冠层振幅与振动时间、振动频率与振动时间、振动频率与振幅两两之间分别对油茶果实采收率和油茶花苞损伤率的交互响应曲面如图 4、5 所示。

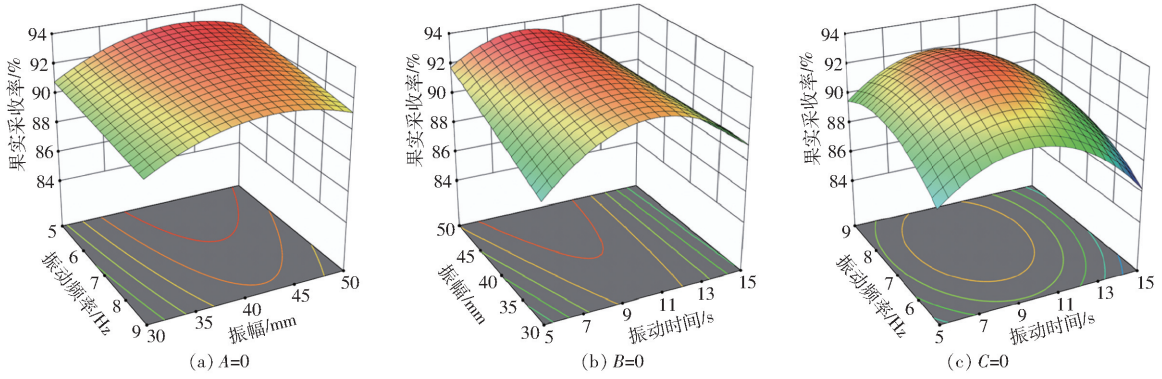


图 4　各因素交互作用对油茶果实采收率响应曲面

Fig. 4　Response surfaces of interaction of various factors on oil camellia fruit recovery

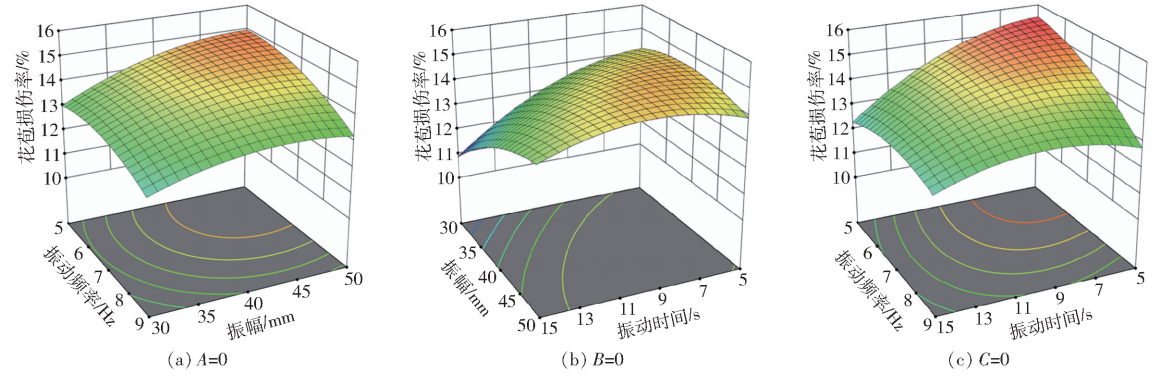


图 5　各因素交互作用对油茶花苞损伤率响应曲面

Fig. 5　Response surfaces of interaction of various factors on damage rate of camellia flower bud

当振动时间为零水平时，振动频率和振幅的交互作用对油茶果实采收率的影响如图 4a 所示。油茶果实采收率与振动频率呈负相关，随着振幅的增大呈先增大后减小的趋势。当振动频率为零水平

时,振幅和振动时间的交互作用对油茶果实采收率的影响如图 4b 所示。油茶果实采收率与振幅呈正相关,随着振动时间的增大呈先增大后减小的趋势。当振幅为零水平时,振动频率和振动时间的交互作用对油茶果实采收率的影响如图 4c 所示。油茶果实采收率随着振动时间的增大呈先增大后减小的趋势,随着振动频率的增大呈先增大后减小的趋势。

当振动时间为零水平时,振动频率和振幅的交互作用对油茶花苞损伤率的影响如图 5a 所示。油茶花苞损伤率与振幅呈正相关,与振动频率呈负相关。当振动频率为零水平时,振幅和振动时间的交互作用对油茶花苞损伤率的影响如图 5b 所示。油茶花苞损伤率与振幅呈正相关,与振动时间呈负相关。当振幅为零水平时,振动频率和振动时间的交互作用对油茶花苞损伤率的影响如图 5c 所示。油茶花苞损伤率与振动频率呈负相关,与振动时间呈负相关。

3.4 振动参数优化

根据上述试验结果分析,不同的冠层振动参数对油茶果采摘具有较大的影响,为获得油茶果冠层振动采摘的最优工作参数,利用 Design-Expert 11.0.4 软件的优化模块,对油茶果实采收率和花苞损伤率的二次回归模型进行优化求解。设定油茶果实采收率权重为 0.67,油茶花苞损伤率权重为 0.33,设置目标函数进行求解。目标函数为

$$\begin{cases} \max G(A,B,C) \\ \min H(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{20}$$

对目标函数优化求解得到油茶果冠层振动采摘最优工作参数组合为:振动时间 8.09 s、振动频率 8.15 Hz、振幅 50 mm,在此参数组合下油茶果实采收率为 93.41%,油茶花苞损伤率为 14.10%。

4 田间试验

为验证仿真试验参数优化结果的可靠性,利用项目组研制的树冠激振式油茶果采收机在湖南省永州市油茶基地对湘林 210 品种油茶进行了田间试验,如图 6 所示。



图 6 田间试验

Fig. 6 Photos of field test

在田间试验过程中,以油茶树冠层激振处的振幅、振动频率和振动时间为试验因素,以油茶果实采收率和油茶花苞损伤率为试验指标。由于树冠激振式油茶果采收机在工作过程中控制精度有限,所以对优化后油茶树冠层最优振动组合参数进行四舍五入取整:振动时间 8 s、振动频率 8 Hz、振幅 50 mm。选取仿真试验方案中油茶果采收率最高的第 1 组试验参数组合:振动时间 10 s、振动频率 7 Hz、振幅 40 mm 作为对照组。田间试验方案分别设置优化参数和对照组参数组合进行 3 次重复试验。田间试验过程中分别记录振动采收区域的油茶果实和油茶花苞的总数量和振动后脱落数量,最终试验结果取平均值,如表 5 所示。

表 5 验证试验结果

Tab. 5 Verification test results

序号	试验组						对照组					
	挂果数/个	落果数/个	果实采收率 G/%	挂花数/朵	落花数/朵	花苞损伤率 H/%	挂果数/个	落果数/个	果实采收率 G/%	挂花数/朵	落花数/朵	花苞损伤率 H%
1	75	70	93.33	192	30	15.63	52	48	92.31	144	24	16.67
2	57	52	91.23	137	18	13.14	67	60	89.55	153	22	14.38
3	67	62	92.54	174	25	14.37	48	44	91.67	182	30	16.48
平均值			92.37			14.38			91.18			15.84

田间试验结果表明,通过对照参数组合试验,以油茶冠层振动参数优化后的结果为试验组的采摘效果明显优于对照组的采摘效果,油茶果实采收率试验组高于对照组、油茶花苞损伤率试验组低于对照组。试验组在振动时间 8 s、振动频率 8 Hz、振幅 50 mm 振动参数下油茶果实采收率为 92.37%,与理论优化值相差 1.04 个百分点;油茶花苞损伤率为 14.38%,与理论优化值相差 0.28 个百分点。

在田间试验过程中,存在有个别油茶果实未脱落的现象。其原因 1 是未脱落的油茶果实未到成熟期,油茶果实和枝条的结合力较大,导致振动采收过程中油茶果实的惯性力小于果实与枝条的结合力,

不足以使其油茶果实脱落；其原因 2 是未脱落油茶果实大多分布在振动区域的边缘，激振装置对油茶枝条的振动范围有限，未能使振动区域边缘的油茶果实产生足够大的惯性力，导致油茶果实未能脱落。试验验证结果显示优化后得到的油茶果冠层振动参数具有较好的可靠性，说明建立的油茶“果实-枝条”双摆动力学模型具有较高的准确性。

5　结论

（1）利用拉格朗日函数，针对湘林 210 品种油茶为对象建立了四自由度油茶“果实-枝条”双摆模型，并对动力学模型进行分析求解，得到系统的固有频率为 0.42、7.18 Hz；对油茶果实和花苞振动脱落受力分析得到油茶果实和花苞脱落的平均加速度分别为 427.15、1 936 m/s^2。

（2）运用 ADAMS 动力学仿真软件对油茶果冠层振动采摘进行仿真，分析油茶树冠层所受的不同振动参数组合对油茶果采摘的影响。建立以油茶果实采收率、油茶花苞损伤率为响应指标的二次多项式响应回归模型以及响应曲面分析；通过各因素贡献率计算得出油茶树冠层各振动因素对油茶果实采收率的影响由大到小为：振动时间、振动频率和振幅；油茶树冠层各振动因素对油茶花苞损伤率的影响由大到小为：振动时间、振幅和振动频率。

（3）根据仿真试验数据对油茶果冠层振动采摘工作参数进行优化计算，油茶果冠层振动采摘最优参数组合为：振动时间 8.09 s、振动频率 8.15 Hz、振幅 50 mm，在此参数组合下油茶果实采收率为 93.41%，油茶花苞损伤率为 14.10%。

（4）通过对照试验表明，振动时间 8 s、振动频率 8 Hz、振幅 50 mm 是项目组研制的树冠激振式油茶果采收机采摘湘林 210 品种油茶果的最优振动参数组合。在最优振动参数组合下油茶果实采收率为 92.37%、油茶花苞损伤率为 14.38%，与理论值相差 1.04、0.28 个百分点，相对于人工采摘油茶果的效率明显提高。

参　考　文　献

[1] 资讯[J]. 绿色中国，2020(23)：6－7.

[2] 赵昌娜，陈宏波. 天津市设施农业园区机械化主要环节发展思考[J]. 农业工程，2018，8(5)：6－11.
ZHAO Changna, CHEN Hongbo. Thoughts on development of main links of mechanization in facility agriculture park in Tianjin City[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(5): 6－11. (in Chinese)

[3] 杜小强，李党伟，王丹，等. 小型侧翼折展式林果收集装置的设计与试验[J]. 农业工程学报，2017，33(14)：11－17.
DU Xiaoqiang, LI Dangwei, WANG Dan, et al. Design and experiment on small fruit collecting device with flank deployable and foldable mechanisms[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 11－17. (in Chinese)

[4] 杜小强，李党伟，贺磊盈，等. 基于电子果实技术的机械振动采收过程果实运动分析[J]. 农业工程学报，2017，33(17)：58－64.
DU Xiaoqiang, LI Dangwei, HE Leiying, et al. Fruit motion analysis in process of mechanical vibration harvesting based on electronic fruit technique[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 58－64. (in Chinese)

[5] 陈永忠，邓绍宏，陈隆升，等. 油茶产业发展 新论[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2020，44(1)：1－10.
CHEN Yongzhong, DENG Shaohong, CHEN Longsheng, et al. A new view on the development of oil tea camellia industry[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(1): 1－10. (in Chinese)

[6] 散鋆龙，杨会民，王学农，等. 振动方式和频率对杏树振动采收响应的影响[J]. 农业工程学报，2018，34(8)：10－17.
SAN Yunlong, YANG Huimin, WANG Xuenong, et al. Effects of vibration mode and frequency on vibration harvesting of apricot trees[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(8): 10－17. (in Chinese)

[7] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 1－20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20201101&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.001. (in Chinese)

[8] BLANCO-ROLDÁN G L, GIL-RIBES J A, KOURABA K, et al. Effects of trunk shaker duration and repetitions on removal efficiency for the harvesting of oil olives[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(3): 329－334.

[9] BAETEN J, DONNÉ K, BOEDRIJ S, et al. Autonomous fruit picking machine: a robotic apple harvester[J]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2007, 42(51): 531－539.

[10] HE L, ZHOU J, DU X, et al. Energy efficacy analysis of a mechanical shaker insweet cherry harvesting[J]. Biosystems Engineering, 2013, 116(4): 309－315.

[11] 王金武，唐汉，王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(5)：1－21.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1－21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/viewabstract.aspx? flag=1&file_no=20170501&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.

issn. 1000-1298. 2017. 05. 001. (in Chinese)
[12] 饶洪辉,黄登昇,王玉龙,等. 液压驱动式油茶果采摘机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):133 - 139,147.
RAO Honghui, HUANG Dengsheng, WANG Yulong, et al. Design and experiment of hydraulic driven camellia fruit picking machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):133 - 139,147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190515&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.015. (in Chinese)
[13] 饶洪辉,张立勇,黄登昇,等. 电动胶辊旋转式油茶果采摘执行器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(9):115 - 121.
RAO Honghui,ZHANG Liyong,HUANG Dengsheng, et al. Design and test of motor-driven picking actuator of camellia fruit with rotate rubber roller[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(9):115 - 121. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180913&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.013. (in Chinese)
[14] UPADHYAYA S K, RAND R H, COOKE J R. Dynamics of fruit tree trunk impact[J]. Trans. ASAE, 1981, 24(4):846 - 855.
[15] RAND R H, COOKE J R. Vibratory fruit harvesting: a non-linear theory of fruit-stem dynamics[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1970,15(4):347 - 363.
[16] LÁNG Z. Dynamic modelling structure of a fruit tree for inertial shaker system design[J]. Biosystems Engineering, 2006,93(1):823 - 829.
[17] LÁNG Z. A fruit tree stability model for static and dynamic loading[J]. Biosystems Engineering,2003,85(4):461 - 466.
[18] LÁNG Z. A one degree of freedom damped fruit tree model[J]. Trans. ASABE, 2008,51(3):823 - 829.
[19] CASTRO-GARCÍA S, BLANCO-ROLDÁN G L, GIL-RIBES J A. Vibrational and operational parameters in mechanical cone harvesting of stone pine (*Pinus pinea* L.)[J]. Biosystems Engineering,2012,112(4):352 - 358.
[20] ARISTIZÁBAL I D, OLIVEROS C E, ALVAREZ F. Mechanical harvest of coffee applying circular and multidirectional vibrations[C]// ASAE International Meeting,2000.
[21] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):176 - 182,195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20201119&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.019. (in Chinese)
[22] 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)
[23] 散鋆龙,杨会民,王学农,等. 振动收获过程中杏果实脱落的动态响应[J]. 农业工程学报,2018,34(18):68 - 75.
SAN Yunlong, YANG Huimin, WANG Xuenong, et al. Dynamic response analysis of apricot fruit dropping during vibration harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18):68 - 75. (in Chinese)
[24] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(4):21 - 33. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20210402&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.002. (in Chinese)
[25] 付威,张志元,刘玉冬,等. 振动激励下枣树力传递效果室内模拟试验[J]. 农业工程学报, 2017,33(17):65 - 72.
FU Wei, ZHANG Zhiyuan, LIU Yudong, et al. Simulation experiment in lab on force transfer effect of jujube under vibration excitation[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(17):65 - 72. (in Chinese)
[26] 徐丽明,陈俊威,吴刚,等. 梳刷振动式枸杞收获装置设计与运行参数优化[J]. 农业工程学报,2018,34(9):75 - 82.
XU Liming, CHEN Junwei, WU Gang, et al. Design and operating parameter optimization of comb brush vibratory harvesting device for wolfberry[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(9):75 - 82. (in Chinese)
[27] 谢承健. 油茶果采摘机关键部件设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2019.
XIE Chengjian. Design and experiment of key components of camellia fruit picking machine[D]. Hefei: Anhui Agricultural University,2019. (in Chinese)
[28] 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 and fruit tree [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology,2020. (in Chinese)