

基于能量传递规律的油茶树冠层振动参数优化与试验

伍德林 赵恩龙 姜山 王韦韦 袁嘉豪 王奎

(安徽农业大学工学院, 合肥 230036)

摘要: 油茶作为中国特有的木本油料作物,在空间上具有复杂的分枝结构,不同品种树体的形态结构和力学性能差异明显。为了研究油茶树在冠层振动采摘油茶果过程中能量传递规律以及获得最佳激振参数,本文建立5自由度油茶树的质量-弹性-阻尼动力学模型并测量和计算等效参数;以不同激振参数为输入,通过Matlab软件对动力学模型进行仿真,并设计二次旋转正交组合试验,仿真结果表明,油茶树各级枝之间能量传递过程中损失严重,从激振力所作用的枝条传递到路径末枝时能量剩余不到20%;且油茶树各级枝的动能峰值出现的时间具有滞后性,越靠近激振点的动能峰值出现越早。由于油茶树各级枝间能量传递损失严重,将一棵树进行2~3次振动采摘。利用Design-Expert 11.0.4软件的优化模块对激振参数进行优化求解,以一部分侧枝动能最大,主干动能最小为目标函数时,最佳振动参数组合为振动时间7.14 s、振动频率7.18 Hz、振幅52.41 mm;通过田间试验对油茶树能量传递规律进一步研究发现,能量沿着树枝内部传递时与各级枝之间的传递规律相同,即动能与传递距离成反比,传递的距离越远动能越小。并对仿真结果进行验证;田间试验结果与仿真结果的相对误差在10%以内,说明该动力学模型具有较高的可靠性;振动采摘部分的油茶果实和花苞平均脱落率分别为90.53%、14.39%,采摘效果较好,证明了从能量传递角度对激振参数优化的可行性。本文建立的动力学模型和预测的最佳振动参数组合可以为油茶果机械化采摘作业的工作参数设置提供参考。

关键词: 油茶树; 振动采摘; 冠层振动; 参数优化; 仿真分析; 能量传递

中图分类号: S225.93

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)08-0023-11

OSID:



Optimization and Experiment of Canopy Vibration Parameters of *Camellia oleifera* Based on Energy Transfer Characteristics

WU Delin ZHAO Enlong JIANG Shan WANG Weiwei YUAN Jiahao WANG Kui

(School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: *Camellia oleifera* is a unique woody edible oil tree species in China. Trees have complex branching structure in space and the morphological structure and mechanical properties of different tree species are different even among the same tree species. In order to study the energy transfer law and optimal excitation parameters of camellia tree during canopy vibration picking, a mass - elasticity - damping model of camellia tree with five degrees of freedom was established, including the trunk of camellia tree, two primary side branches and two secondary side branches. The equivalent parameters were measured and calculated by the rope pull test and logarithmic attenuation method. The simulation block diagram of differential motion equation was established by using Simulink component in Matlab software, and the excitation force under different excitation parameters was used as the input for simulation test. The simulation results showed that the energy loss was 80.9% during the transfer from the secondary branch C1 to C2, that was, less than 20% of the energy was left when the input branch was transferred to the end branch of the path. From the input position along the transfer path, the time for reaching the kinetic energy peak of each branch was extended once, indicating that there was hysteresis in the energy transfer process. The optimization module of Design-Expert 11.0.4 software was used to optimize and solve the excitation parameters, because of the serious loss of energy transfer between branches of camellia sinensis, a tree was picked by vibration for 2~3 times. When the objective function was to maximize the kinetic energy of some side branches and minimize the kinetic energy of the main

收稿日期: 2022-04-28 修回日期: 2022-06-09

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(2208085ME132)和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

trunk, and the optimal combination of vibration parameters was obtained as follows: vibration time was 7.14 s, vibration frequency was 7.18 Hz, and amplitude was 52.41 mm. Under this parameter combination, the kinetic energy of camellia trunk A was 2.59 J. The kinetic energy of the first branch B1 and B2 was 15.09 J and 9.64 J, respectively. The kinetic energy of the secondary branch C1 and C2 was 23.93 J and 4.61 J, respectively. Field experiments were carried out to verify the simulation results. The results showed that the kinetic energy was inversely proportional to the transfer distance when the energy was transferred along the branches, and the longer the transfer distance was, the smaller the energy was. The closer to the excitation was, the shorter the time to reach the energy peak. There was also a lag in the energy transfer process inside the branches. The mean kinetic energy of trunk A, primary branch B1, B2 and secondary branch C1 and C2 of *Camellia oleifera* in field experiment were 2.73 J, 13.68 J, 8.98 J, 22.05 J and 4.18 J, respectively, and the relative errors were 7.34%, 9.37%, 6.81%, 7.86% and 9.39%, respectively. All of them were less than 10%, indicating that the dynamic model had high reliability. The average abscission rates of *Camellia oleifera* fruits and buds were 90.53% and 14.39%, respectively, and the picking effect was good, and the parameter combination met the requirements of mechanized harvesting. The established dynamic model and the optimal combination of predicted vibration parameters can provide reference for the parameter setting of mechanized *Camellia oleifera* fruit picking operation.

Key words: *Camellia oleifera*; vibration picking; canopy vibration; parameter optimization; simulation analysis; energy transfer

0 引言

油茶是我国特有的油料作物,近年来我国油茶产业发展迅猛,种植面积达到 $4.36453 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 茶油产量达到 $6.7 \times 10^4 \text{ t}^{[1-3]}$ 。随着我国机械化的快速发展,高强度的农业劳作逐渐被机器取代,林果的收获作业正处在从人工到半机械、机械化的演变过程中^[4-6]。振动方式已被证明是林果机械化收获作业的有效手段^[7-10];因此,针对不同树种的受迫响应以及能量传递规律的研究尤为重要。

HE等^[11]利用机械振动器对选取的甜樱桃树的枝条进行振动,在能量传递的过程中分析各响应区的动能变化。SOLA-GUIRADO等^[12]通过测量橄榄树上多个点的加速度,分析不同高度对树体振动的影响。DU等^[13]对甜樱桃树进行激振试验,研究发现距离激振点位置越远的树枝位移响应越大,能量传递效率与树体结构有关,横向分枝较少的树体从激励位置至末端的能量传递效率较高。李斌等^[14]利用一种动-定梳排组合式采摘机构进行了荔枝采摘试验,对树枝的能量传递特性进行了研究。当作用位置接近于树冠外侧位置上的侧枝时,传递至最末端树枝上的振动能量利用的效率更高。但其结果具有局限性,其他类型作用机构对树体的影响有待进一步研究。LÁNG等^[15-16]建立了一种二自由度的果树模型分析樱桃树的动能响应。该模型的计算结果与实际测试结果吻合较好。刘晓雯等^[17]为研究苹果振动采收最佳频率,基于伯努利梁建立了树枝动力学模型,采用有限元法得到不同激励下树枝的响应,发现枝条在振动下具有不相关性,频率越高,能量的传递效率越高。魏

庭鹏等^[18]将海棠树的树干与树枝的模型简化为两个自由度的质量刚度阻尼模型,并建立运动方程,通过 Matlab 对方程进行仿真,并通过试验验证,得到了使得果实下落的最佳振动频率为 1.72、4.18、7.72 Hz, 载荷的增加使得加速度响应幅值逐渐增加。

综上所述,学者们已经对一些果树进行能量传递特性的研究。但是在振动采摘过程中,不同种类树的能量传递特性存在较大差异。本文以油茶树为研究对象,建立树枝质量-弹簧-阻尼动力学模型;以不同激振参数作为输入,通过 Matlab 软件对运动方程进行仿真,分析油茶树各级枝间的能量传递规律,并确定油茶树冠层振动采摘油茶果的振动方法;利用 Design-Expert 11.0.4 软件设计仿真试验,并对振动参数进行优化;通过田间试验对冠层振动采摘油茶果过程中油茶树能量传递规律进一步研究,并对仿真分析结果进行验证,通过采摘效果证明从能量传递角度优化振动参数方法的有效性。

1 油茶树枝动力学模型建立

果树的物理性质比较复杂,枝条是一个复杂的、连续的、非线性的柔性系统,系统运动的幅度与所受的外载荷成非线性关系^[19]。现有研究表明利用质量-弹簧-阻尼模型研究树木的动力学特性比较符合实际^[20]。利用线性模型对非线性的枝条进行离散表达,进而研究果树枝干的动力学特性。

1.1 质量-弹簧-阻尼模型建立

树木主要以单轴和合轴(Y型)的分枝方式生长,这与生长环境之间存在复杂的联系^[21]。油茶树的分枝方式多数以合轴的方式生长,因此本文以 Y

型油茶树为研究对象,如图 1a 所示,图中 1~16 为加速度传感器的安装位置。建立包含 1 个主干、2 个一级侧枝和 2 个二级侧枝的 5 自由度振动等效动力学模型,如图 1b 所示。

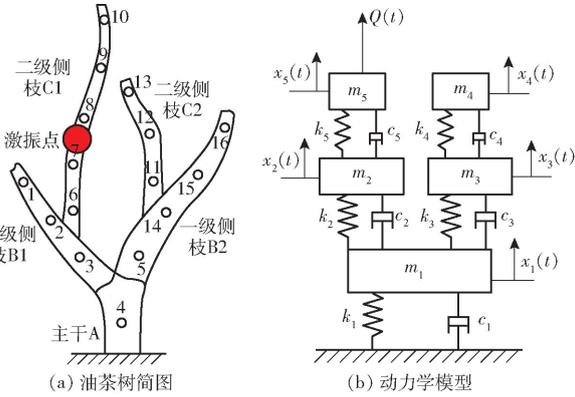


图 1 油茶树枝动力学模型

Fig. 1 Dynamics models of *Camellia oleifera*

将油茶树的主干和各级分枝简化为质量块在弹簧和阻尼约束下的 5 自由度系统,油茶树枝在采摘装置作用下的运动被简化为等效模型在激振力 $Q(t)$ 作用下的运动。令油茶树主干 A、一级侧枝 B1、B2、二级侧枝 C1、C2 离开平衡位置的位移分别为 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 、 $x_3(t)$ 、 $x_4(t)$ 、 $x_5(t)$ 。

当油茶树受迫振动时,对于主干 A 的响应可以视为一级侧枝 B1、B2 的作用效果;即两个质量分别为 m_2 、 m_3 ,刚度分别为 k_2 、 k_3 和阻尼系数分别为 c_2 、 c_3 的系统对质量为 m_1 、刚度为 k_1 和阻尼系数为 c_1 的作用。根据力的平衡条件并整理有

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1(t) + (c_1 + c_2 + c_3) \dot{x}_1(t) - \\ c_3 \dot{x}_3(t) + (k_1 + k_2 + k_3) x_1(t) - \\ k_2 x_2(t) - k_3 x_3(t) - c_2 \dot{x}_2(t) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

对于一级侧枝 B1 的响应可以视为二级侧枝 C1 和主干 A 的作用效果;即两个质量分别为 m_5 、 m_1 ,刚度分别为 k_5 、 k_1 和阻尼系数分别为 c_5 、 c_1 的系统对质量为 m_2 、刚度为 k_2 和阻尼系数为 c_2 的作用。根据力的平衡条件并整理有

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{x}_2(t) + (c_2 + c_5) \dot{x}_2(t) - \\ c_5 \dot{x}_5(t) - k_2 x_1(t) - c_2 \dot{x}_1(t) + \\ (k_2 + k_5) x_2(t) - k_5 x_5(t) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

对于一级侧枝 B2 的响应可以视为二级侧枝 C2 和主干 A 的作用效果;即两个质量分别为 m_4 、 m_1 ,刚度分别为 k_4 、 k_1 和阻尼系数分别为 c_4 、 c_1 的系统对质量为 m_3 、刚度为 k_3 和阻尼系数为 c_3 的作用。根据力的平衡条件并整理有

$$\begin{aligned} m_3 \ddot{x}_3(t) + (c_3 + c_4) \dot{x}_3(t) - c_4 \dot{x}_4(t) - k_3 x_1(t) - \\ c_3 \dot{x}_1(t) + (k_3 + k_4) x_3(t) - k_4 x_4(t) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

对于二级侧枝 C2 的响应可以视为一级侧枝 B2

的作用效果;即一个质量为 m_3 ,刚度为 k_3 和阻尼系数为 c_3 的系统对质量为 m_4 、刚度为 k_4 和阻尼系数为 c_4 的作用。根据力的平衡条件并整理有

$$\begin{aligned} m_4 \ddot{x}_4(t) - c_4 \dot{x}_3(t) + c_4 \dot{x}_4(t) - \\ k_4 x_3(t) + k_4 x_4(t) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

对于二级侧枝 C1 的响应可以视为一级侧枝 B1 和激振力 $Q(t)$ 的作用效果;即一个质量为 m_2 ,刚度为 k_2 和阻尼系数为 c_2 与外部激振力 $Q(t)$ 的系统对质量为 m_5 、刚度为 k_5 和阻尼系数为 c_5 的作用。根据力的平衡条件并整理有

$$\begin{aligned} Q(t) = m_5 \ddot{x}_5(t) - c_5 \dot{x}_2(t) + c_5 \dot{x}_5(t) - \\ k_5 x_2(t) + k_5 x_5(t) \end{aligned} \quad (5)$$

将油茶树主干以及各级枝受迫振动的运动学方程(1)~(5)整理,写成矩阵的形式为

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5]^T$$

$$\mathbf{F} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad Q(t)]^T$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 + c_3 & -c_2 & -c_3 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_5 & 0 & 0 & -c_5 \\ -c_3 & 0 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4 & 0 \\ 0 & -c_5 & 0 & 0 & -c_5 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_3 & -k_2 & -k_3 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_5 & 0 & 0 & -k_5 \\ -k_3 & 0 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 & 0 \\ 0 & -k_5 & 0 & 0 & -k_5 \end{bmatrix}$$

式中 \mathbf{x} ——位移矩阵 \mathbf{M} ——质量矩阵

\mathbf{F} ——作用力矩阵

\mathbf{C} ——阻尼系数矩阵 \mathbf{K} ——刚度矩阵

1.2 动力学模型等效参数确定

阻尼比是一个与结构相关的物理量,并不代表材料性能参数^[22]。然而,对于大多数材料,相似尺寸和结构的试件测得的阻尼比接近^[23]。

在样本树上选取适当的位置布置加速度传感器,拉动棉绳使树枝产生一定的位移,随后迅速释放棉绳。利用 KDDASP 型仪器对动态信号进行采集,在样本树上重复进行 3 次试验,选取衰减曲线较为清晰的一组进行分析。各级枝衰减曲线如图 2 所示。

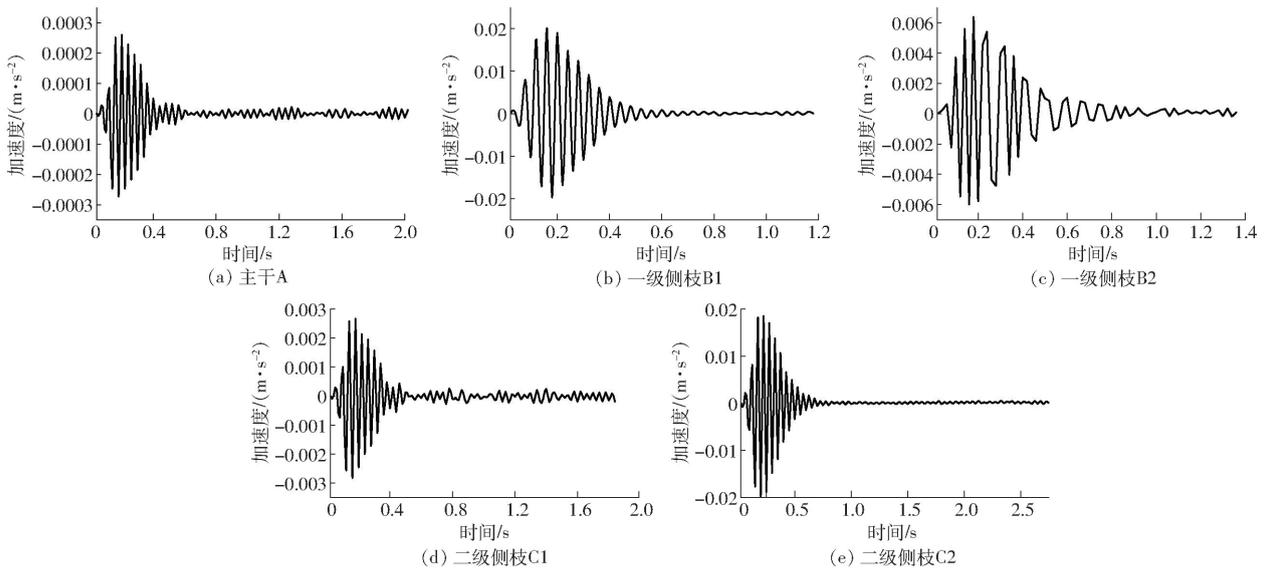


图2 各测点衰减曲线

Fig. 2 Attenuation curves of each measuring point

利用对数衰减法求出油茶树各级枝的阻尼比, 计算式为

$$\xi = \frac{\delta}{2\pi} \quad (7)$$

其中

$$\delta = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}} \quad (8)$$

式中 A_i ——同方向相邻前一个振幅, mm

A_{i+1} ——同方向相邻后一个振幅, mm

δ ——对数衰减率

ξ ——阻尼比

通过式(7)、(8)计算得出油茶树主干 A, 一级侧枝 B1、B2 和二级侧枝 C1、C2 的阻尼比分别为 0.408 3、0.134 3、0.061 4、0.091 4、0.080 1。

通过试验测得的动态加速度信号, 利用 FRF 频响函数分析得到激励力与主干、一级侧枝、二级侧枝之间的频响函数如图 3 所示, 各级树枝上都存在较多的固有频率, 本文只对频率 35 Hz 内的情况进行研究。

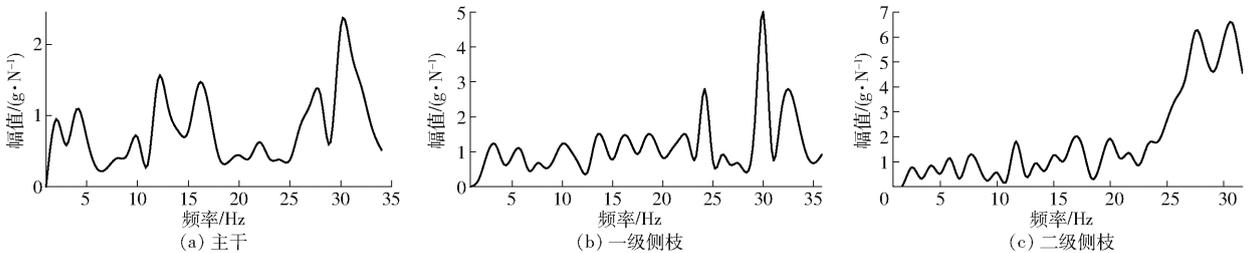


图3 油茶树各级枝频响函数

Fig. 3 Frequency response functions of all branches of *Camellia oleifera*

由图 3 可知, 主干的前 5 阶固有频率分别是 0.97、2.98、5.35、7.81、9.77 Hz。一级侧枝前 5 阶固有频率分别是 0.97、2.98、8.79、12.7、14.65 Hz。二级侧枝前 5 阶固有频率分别是 0.97、2.98、4.88、6.84、8.47 Hz。可以发现, 果树上不同级别树枝的低阶固有频率有相同也有不同, 从分析的结果来看, 主干、一级侧枝、二级侧枝的相同固有频率为 0.97、2.98 Hz。

油茶果冠层振动式采摘中, 在树体的共振频率下作业, 树枝的响应更为理想。作业时需要一级侧枝和二级侧枝产生共振来提高树枝上的振动能量, 从而更有利于果实的脱落。在振动采摘过程中振动响应较大, 所以在计算过程中选择固有频率为 2.98 Hz。

对选取的样本油茶树生物性状进行测量, 获得油树枝的直径 d 和长度 l 平均值。

等效质量 m 为

$$m = \rho l \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \quad (9)$$

式中 ρ ——油茶树密度, 取 950 kg/m^3 [24]

等效刚度 k 为

$$k = \omega_0^2 m \quad (10)$$

式中 ω_0 ——油茶树固有频率, 取 2.98 Hz

等效阻尼系数 c 为

$$c = 2\xi \sqrt{mk} \quad (11)$$

利用本课题组研发制作的“树冠振动式油茶果采收机”作为激振装置, 其工作原理是曲柄-连杆-

滑块机构^[25]。所以等效激振力 F 为

$$F = M_0 \omega^2 r \sin(\omega t) \quad (12)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (13)$$

式中 M_0 ——激振装置质量,取 5 kg

ω ——角速度,rad/s

r ——曲柄半径,mm

t ——工作时间,s f ——激振频率,Hz

对 30 个随机样本进行测量计算,得到油茶树等效模型所确定的各等效参数如表 1 所示。

表 1 油茶树等效参数

Tab. 1 Equivalent parameters of *Camellia oleifera*

部位	直径 d/mm		长度 l/mm		等效质量 m/kg		等效刚度 $k/(kN \cdot m^{-1})$		等效阻尼系数 $c/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	
	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差
主干 A	47	7.20	320	68.87	0.53	0.20	4.68	1.77	1.28	0.48
一级侧枝 B1	25	9.11	900	20.85	0.42	0.30	3.73	2.74	0.34	0.25
一级侧枝 B2	23	4.80	900	121.82	0.36	0.16	3.15	1.46	0.13	0.06
二级侧枝 C1	20	8.49	1 000	432.96	0.30	0.28	2.65	2.48	0.16	0.15
二级侧枝 C2	18	7.22	1 000	317.76	0.24	0.24	2.15	2.17	0.12	0.12

注:数据由 30 个统计样本计算获得。

2 仿真分析

利用动能衡量油茶树各级枝上的能量,对不同级树枝上动能进行测量计算,进而研究能量的变化规律。采用 Matlab 软件中的 Simulink 模块的子系

统封装技术^[26],建立油茶果树等效模型的运动微分方程如图 4 所示。

子控制系统与封装系统的通讯连接通过图中标注的数字实现,即相同数字相互连通。图中的 1 ~ 10 号端口分别为各子控制系统的输入端,11 ~ 20 号

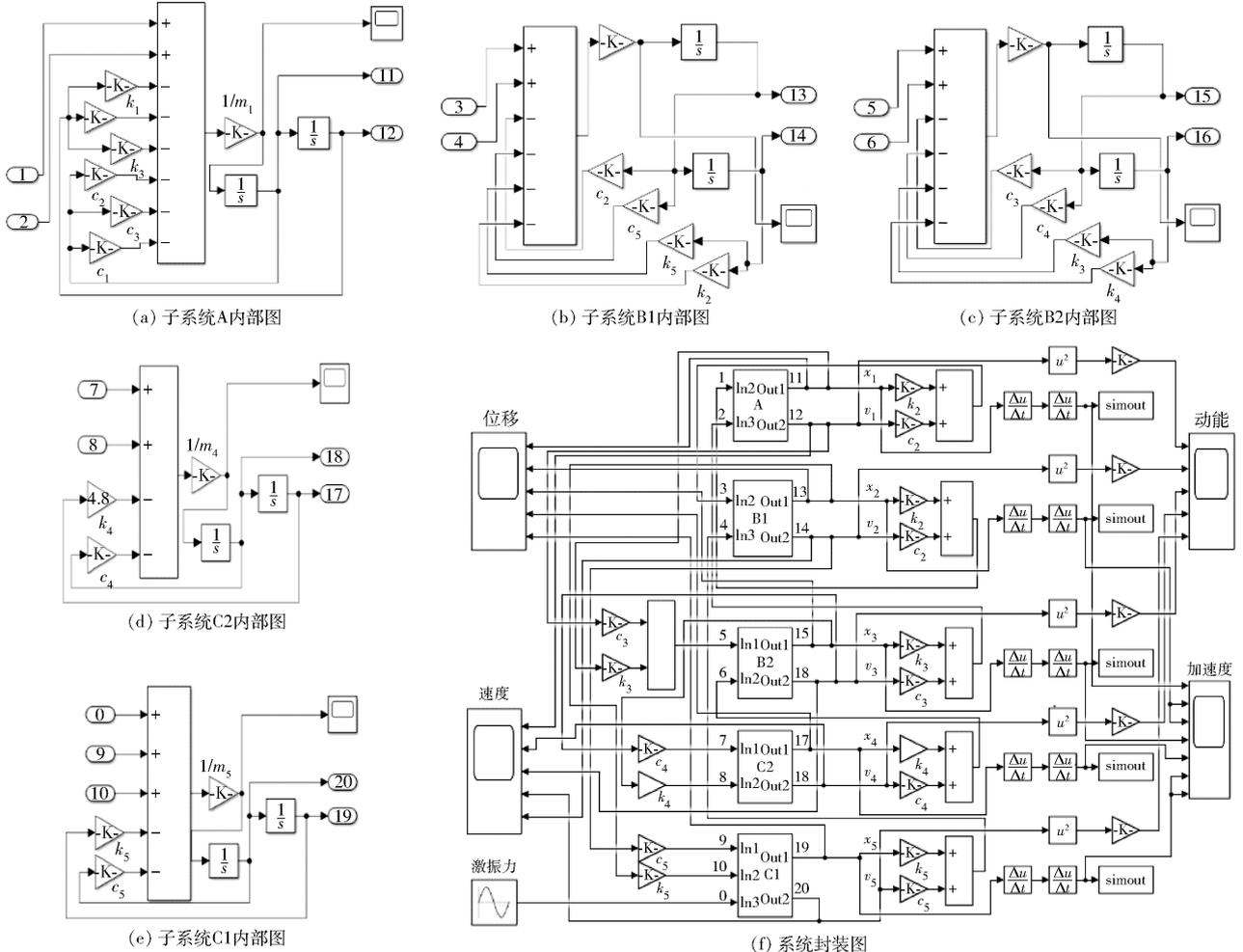


图 4 运动微分方程仿真框图

Fig. 4 Block diagrams of motion differential equation simulation

端口分别为各子控制系统的输出端,0号端口为激振力的输入端。图4a~4e为油茶树主干及各级枝的质量弹簧阻尼模型的微分运动方程,图4f为系统封装图。

利用Subsystem模块分别建立5自由度油茶树质量-弹簧-阻尼系统的各子系统。包括油茶树主干A,一级侧枝B1、B2和二级侧枝C1、C2。将等效参数通过Gain模块带入到各子系统。在子系统中使用Integrator模块进行积分运算,将一次、二次积分所得的速度和位移输出到子系统外,输出的速度和位移作为输入通过Gain模块以及Adds模块根据动力学方程连接到相应的子系统中;对子系统输出的位移使用Derivative模块进行两次微分运算得到各子系统的加速度,通过Scope模块显示加速度的变化曲线,利用Math Function模块对子系统的速度进行平方运算,连接等效质量作为增益的Gain模块进行各模块的动能计算,将其都连接至一个Scope模块显示各级枝的动能变换曲线。通过To Workspace模块将数据输出到工作空间。将不同频率不同振幅下的等效力作为输入进行动力学仿真。

2.1 各级枝间能量传递规律

根据前期研究,选择采摘效果相对较好、能量传递规律明显的振动参数组合进行能量传递规律分析。以频率为5 Hz、振幅为60 mm时的等效激振力作为输入,仿真时间为5 s,得到各级枝条的动能变化曲线如图5所示。

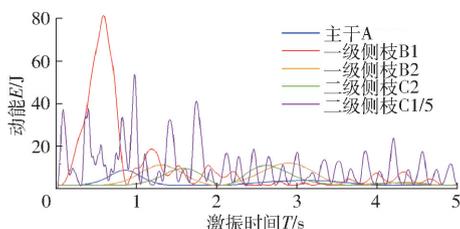


图5 油茶树各级枝的动能变化曲线

Fig. 5 Kinetic energy change of branches of *Camellia oleifera* branches

由图5可知,激振力所作用的二级侧枝C1的动能平均值最大,其次是一级侧枝B1,主干A的动能平均值最小。其原因可能是油茶树主干与根部相连接,振动趋势受大地的阻力作用较大。二级侧枝C1到一级侧枝B1的能量下降了52.65%,从一级侧枝B1到油茶树主干A的能量下降了74.33%,从一级侧枝B1传递到B2时能量下降26.02%,从一级侧枝B2传递到二级侧枝C2的能量下降45.49%,能量由二级侧枝C1传递到二级侧枝C2的过程中,能量损失80.9%。

通过对比油茶树主干以及各级侧枝达到动能峰

值的时间可知,激振力所作用的二级侧枝C1首先达到动能峰值,其次是一级侧枝B1,随后是主干A,接着是一级侧枝B2,最后是二级侧枝C2;因此,从激振位置沿着传递路径,油茶树主干及各级枝的动能峰值出现的时间具有滞后性。

2.2 仿真试验

为了分析不同振动参数采用冠层振动方式对油茶树主干及各级枝能量传递特性的影响,选择油茶树二级侧枝C1的激振时间、激振频率和振幅为试验因素。由于能量传递过程中损失严重,为了在振动采摘过程中获得较高油茶果采收率,能量传递最后一级侧枝的能量尽可能多。因此,以油茶树主干以及各级枝的动能 E 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,取振动过程中动能平均值作为试验结果。经过前期预试验以及课题组相关研究成果^[27-28],选定各试验因素编码如表2所示。

表2 试验因素编码

Tab. 2 Test factors and level coding

编码	因素		
	振动时间 x/s	振动频率 y/Hz	振幅 z/mm
-1	5	5	50
0	10	7	60
1	15	9	70

2.2.1 仿真试验结果

仿真试验结果如表3所示, X 、 Y 、 Z 为因素编码值。

表3 仿真试验设计方案与结果

Tab. 3 Simulation test design scheme and results

序号	因素			动能 E/J				
	X	Y	Z	主干 A	一级 侧枝 B1	一级 侧枝 B2	二级 侧枝 C1	二级 侧枝 C2
1	-1	1	0	5.85	19.84	12.84	28.34	5.14
2	0	0	0	3.52	7.15	3.85	13.51	1.85
3	1	0	1	3.14	17.71	7.71	31.25	6.78
4	1	0	-1	3.31	10.93	6.93	19.22	3.92
5	-1	0	-1	2.18	13.76	8.76	23.12	4.36
6	0	0	0	2.38	8.14	5.14	13.94	2.04
7	0	0	0	1.81	8.14	4.14	14.37	2.18
8	0	1	1	4.61	16.24	8.24	29.65	5.64
9	1	1	0	1.64	12.32	6.32	25.27	4.82
10	1	-1	0	1.37	6.18	4.98	11.86	1.74
11	-1	-1	0	2.96	11.53	8.53	24.35	4.65
12	0	-1	-1	0.98	3.84	2.44	9.65	0.87
13	0	0	0	1.77	8.86	6.86	13.87	2.34
14	0	1	-1	2.35	7.83	5.83	14.12	2.31
15	0	-1	1	4.15	10.81	8.81	19.54	3.78
16	0	0	0	2.54	9.84	7.84	17.36	3.66
17	-1	0	1	7.67	30.24	24.24	41.65	10.64

2.2.2 方差分析与回归方程建立

动能的仿真试验结果进行方差分析,结果如表 4 所示。

利用 Design-Expert 11.0.4 软件对油茶树各枝

表 4 仿真试验结果方差分析

Tab.4 Analysis of variance of simulation test results

来源	主干 A		一级侧枝 B1		一级侧枝 B2		二级侧枝 C1		二级侧枝 C2	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
模型	11.66	0.0019**	30.79	<0.0001**	9.53	0.0036**	62.82	<0.0001**	20.46	0.0003**
X	25.00	0.0016**	44.47	0.0003**	24.74	0.0016**	54.48	0.0002**	15.15	0.0060**
Y	7.36	0.0301*	31.80	0.0008**	2.20	0.1820	62.48	<0.0001**	12.61	0.0093**
Z	34.14	0.0006**	83.32	<0.0001**	19.19	0.0032**	191.46	<0.0001**	63.21	0.0001**
XY	4.06	0.0839	0.5256	0.4920	0.5399	0.4863	10.84	0.0133*	3.59	0.1002
XZ	18.93	0.0034**	10.50	0.0142*	13.23	0.0083**	5.16	0.0573	6.25	0.0410*
YZ	0.4893	0.5068	0.2314	0.6451	0.9599	0.3599	3.89	0.0893	0.0943	0.7677
X ²	6.40	0.0393*	73.68	<0.0001**	17.25	0.0043**	174.47	<0.0001**	55.11	0.0001**
Y ²	0.6257	0.4549	9.26	0.0188*	2.29	0.1743	3.82	0.0915	5.77	0.0473*
Z ²	7.52	0.0288*	22.68	0.0021**	5.23	0.0560	51.30	0.0002**	21.26	0.0025**
失拟项	0.6224	0.6369	3.92	0.1100	1.84	0.2799	0.6099	0.6432	0.7749	0.5658

注: ** 表示极显著(P<0.01); * 表示显著(P<0.05)。

方差分析结果表明,油茶树主干 A 的多项式回归方程模型的 P 为 0.0019,小于 0.01,说明回归模型极其显著;失拟项的 P 为 0.6369,大于 0.05,说明回归模型比较稳定;模型决定系数 R² 为 0.9374,说明该模型可以反映 93.74% 的响应值变化;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。X、Z 和 XZ 项对回归模型的影响极其显著;Y、X² 和 Z² 项对回归模型的影响显著;XY、YZ 和 Y² 项对回归模型的影响不显著。油茶树主干 A 与激振时间、激振频率、振幅之间的二次多项式回归方程为

$$E_A = 2.40 - 1.15X + 0.62Y + 1.34Z - 0.66XY - 1.42XZ - 0.23YZ + 0.80X^2 - 0.25Y^2 + 0.87Z^2 \quad (14)$$

油茶树一级侧枝 B1 的多项式回归方程的 P < 0.0001,小于 0.01,说明回归模型极其显著;失拟项的 P 为 0.1100,大于 0.05,说明回归模型比较稳定;模型决定系数 R² 为 0.9754,说明该模型可以反映 97.54% 的响应值变化;表明得到的多项式回归模型拟合程度较高,拟合效果较好。X、Y、Z、X² 和 Z² 项对回归模型的影响极其显著;XZ 和 Y² 项对回归模型的影响显著;XY 和 YZ 项对回归模型的影响不显著。油茶树二级侧枝 B1 与激振时间、激振频率、振幅之间的二次多项式回归方程为

$$E_{B1} = 8.43 - 3.53X + 2.98Y + 4.83Z - 0.54XY - 2.43XZ + 0.36YZ + 6.26X^2 - 2.22Y^2 + 3.47Z^2 \quad (15)$$

油茶树一级侧枝 B2 的多项式回归方程的 P 为 0.0036,小于 0.01,说明回归模型极其显著;失拟项

的 P 为 0.2799,大于 0.05,说明回归模型比较稳定;模型决定系数 R² 为 0.9245,说明该模型可以反映 92.45% 的响应值变化;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。X、Z、XZ 和 X² 项对回归模型的影响极其显著;Y、XY、YZ、Y² 和 Z² 对回归模型的影响不显著。油茶树二级侧枝 B2 与激振时间、激振频率、振幅之间的二次多项式回归方程为

$$E_{B2} = 5.57 - 3.55X + 1.06Y + 3.13Z - 0.74XY - 0.68XZ - 0.99YZ + 4.09X^2 - 1.49Y^2 + 2.25Z^2 \quad (16)$$

油茶树二级侧枝 C1 的多项式回归方程的 P < 0.0001,小于 0.01,说明回归模型极其显著;失拟项的 P 为 0.6432,大于 0.05,说明回归模型比较稳定;模型决定系数 R² 为 0.9878,说明该模型可以反映 98.78% 的响应值变化;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。X、Y、Z、X² 和 Z² 对回归模型的影响极其显著;XY 项对回归模型的影响显著;XZ 和 YZ 项对回归模型的影响不显著。油茶树二级侧枝 C1 与激振时间、激振频率、振幅之间的二次多项式回归方程为

$$E_{C1} = 14.61 - 3.73X + 3.99Y + 6.99Z + 2.36XY - 1.63XZ + 1.41YZ + 9.21X^2 - 1.36Y^2 + 4.99Z^2 \quad (17)$$

油茶树二级侧枝 C2 的多项式回归方程的 P 为 0.0003,小于 0.01,说明回归模型极其显著;失拟项的 P 为 0.5658,大于 0.05,说明回归模型比较稳定;模型决定系数 R² 为 0.9634,说明该模型可以反

映 96.34% 的响应值变化;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。 X 、 Y 、 Z 、 XZ 、 X^2 、 Y^2 和 Z^2 对回归模型的影响极其显著; XY 和 YZ 项对回归模型的影响不显著。油茶树二级侧枝 C2 与激振时间、激振频率、振幅之间的二次多项式回归方程为

$$E_{C2} = 2.41 - 0.94X + 0.86Y + 1.92Z + 0.65XY - 0.86XZ + 0.11YZ + 2.47X^2 - 0.80Y^2 + 1.54Z^2 \quad (18)$$

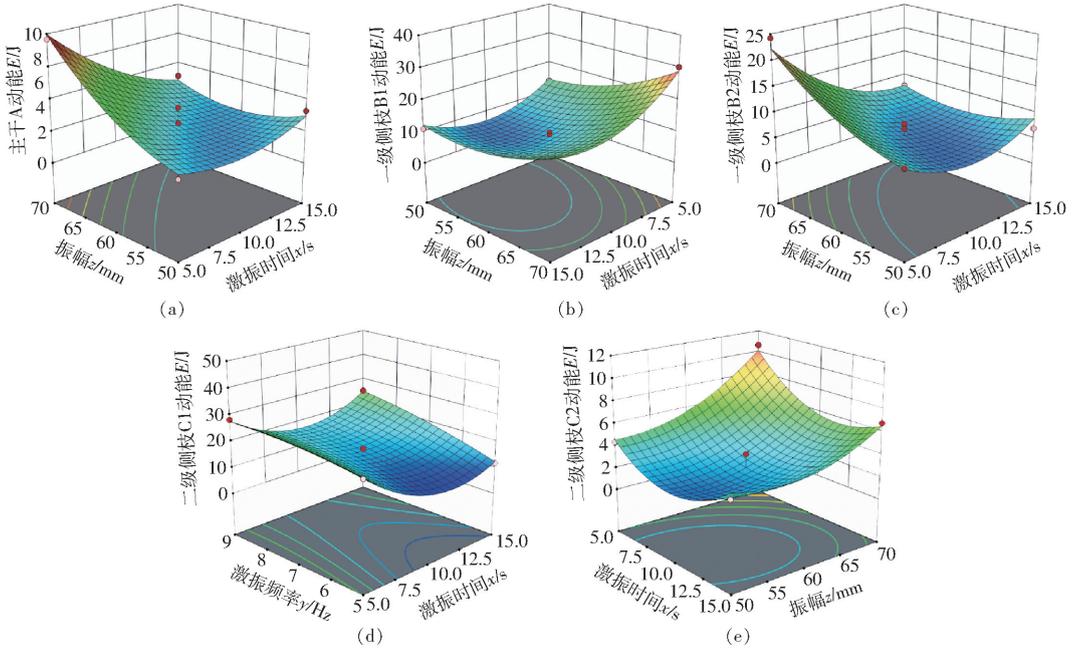


图6 各因素交互作用影响多油茶树枝动能的响应曲面

Fig. 6 Response surfaces of tree kinetic energy of *Camellia oleifera* under interaction of various factors

当激振频率为 7 Hz 时,激振时间和振幅的交互作用对油茶树主干 A、一级侧枝 B1、B2 和二级侧枝 C2 动能的响应曲面如图 6a~6c、6e 所示。油茶树主干 A 的动能与激振时间呈负相关,与振幅呈正相关趋势;一级侧枝 B1 的动能与振幅呈正相关,随着激振时间的增大呈先降低后升高的趋势;当激振时间为 5~10 s 时,一级侧枝 B2 的动能与振幅呈正相关,当激振时间为 10~15 s 时,一级侧枝 B2 和二级侧枝 C2 的动能随着振幅的增大呈先降低后升高的趋势;当振幅为 50~60 mm 时,一级侧枝 B2 的动能随着激振时间的增大呈先降低后升高的趋势,当振幅为 60~70 mm 时,一级侧枝 B2 的动能与激振时间呈负相关;当振幅为 60 mm 时,激振时间和激振频率的交互作用对油茶树二级侧枝 C1 动能的响应曲面如图 6d 所示。油茶树二级侧枝 C1 的动能与激振频率呈正相关,随激振频率的增大而增加,随着激振时间的增加呈先降低后增加的趋势。油茶树各级枝的平均动能随着激振时间的延长而减小,随着振幅的增大而增大,与激振频率的变化动能响应不明显。

2.2.3 响应面分析

根据方差分析可知,激振时间和振幅之间的交互作用对油茶树主干 A、一级侧枝 B1、B2 和二级侧枝 C2 的能量变化是显著的,激振时间和激振频率之间的交互作用对油茶树二级侧枝 C1 的能量变化是显著的,因此利用响应面分析法对交互作用显著项进行分析,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,响应曲面如图 6 所示。

2.2.4 参数优化

根据上述试验结果分析,不同的振动参数对油茶树的能量传递规律具有较大的影响,为获得冠层振动采摘油茶果的最优工作参数,利用 Design-Expert 11.0.4 软件的优化模块进行优化求解。由于油茶树各级枝间的能量传递损失严重,所以对一棵油茶树进行 2~3 次振动采摘的效果最佳。油茶树主干上基本没有油茶果,所以设置优化目标函数为油茶树一级侧枝 B1、二级侧枝 C1 动能最大,主干 A 的动能最小。又二级侧枝油茶果实略多于一级侧枝,故设定二级侧枝 C1 的权重为 0.5,一级侧枝 B1 的权重为 0.4,油茶树主干 A 的权重为 0.1。设置目标函数为

$$\begin{cases} \min E_A(x, y, z) \\ \max E_{B1}(x, y, z) \\ \max E_{C1}(x, y, z) \\ 5 \text{ s} \leq x \leq 15 \text{ s} \\ 5 \text{ Hz} \leq y \leq 9 \text{ Hz} \\ 50 \text{ mm} \leq z \leq 70 \text{ mm} \end{cases} \quad (19)$$

对目标函数优化求解得到油茶果冠层振动采摘的最优工作参数组合为: 振动时间 7.14 s、振动频率 7.18 Hz、振幅 52.41 mm, 在此参数组合下油茶树主干 A 的动能为 2.95 J; 一级侧枝 B1、B2 的动能分别为 15.09、9.64 J; 二级侧枝 C1、C2 的动能分别为 23.93、4.61 J。

3 田间试验

为了进一步研究油茶树在机械采摘过程中的动态响应情况以及验证等效模型和仿真分析的准确性, 利用本课题组研发制造的“树冠振动式油茶果采收机”进行油茶果采摘试验(图 7), 通过 KDDASP 动态信号采集系统进行田间数据采集, 同时记录油茶果实与花苞脱落情况。



图 7 田间试验

Fig. 7 Field experiment

对油茶树按照图 1a 所示的测量点布置加速度传感器, 测量点相距 200 mm 左右。由于激振装置的控制精度有限, 对优化的激振参数结果进行处理, 取激振时间 7 s、激振频率 7 Hz 和振幅 50 mm。设置激振参数对结构相似的油茶树进行 3 次试验, 取平均值作为最后结果。

3.1 同枝条内能量传递规律

为了研究油茶树各级枝条内部的能量传递规律, 在最佳振动参数作用下, 选择一级侧枝 B2 为研究对象, 其上的测点分别为 5、14、15、16。将采集的数据导入 Matlab 中进行数据处理, 以微元段的动能来进行分析, 截取的各测点动能峰值所在段曲线如图 8 所示。

由图 8 可知, 从测点 5 到测点 14 能量峰值减小了 34%, 从测点 14 到测点 15 能量峰值减小了 20%, 从测点 15 到测点 16 能量峰值减小了 23%。能量沿着树枝传递时, 动能与传递距离成反比, 传递的距离越远能量越小; 且越靠近激振位置, 能量峰值出现的时间越短。

3.2 各级枝间能量传递规律与落果率

利用 Matlab 中的数据处理软件对动态信号采

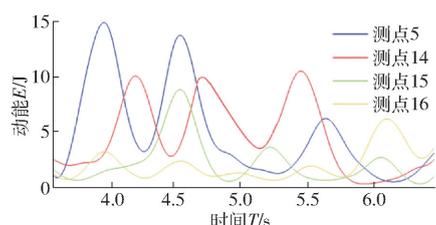


图 8 一级侧枝 B2 上测点 5、14、15、16 动能曲线

Fig. 8 Kinetic energy curves of points 5, 14, 15 and 16 on the first branch B2

集系统采集的试验数据进行处理, 最终取油茶树各级枝上所有测点测量值的平均值作为该级枝的动能。田间试验结果如表 5 所示。

表 5 田间试验结果

Tab. 5 Field test results

序号	动能 E/J					采摘效果	
	主干 A	一级侧枝 B1	一级侧枝 B2	二级侧枝 C1	二级侧枝 C2	落果率/%	落花率/%
1	2.58	14.44	8.48	21.67	3.95	92.54	15.38
2	2.75	13.25	9.15	22.34	3.76	90.46	13.26
3	2.87	13.34	9.32	22.14	4.82	88.58	14.54
平均值	2.73	13.68	8.98	22.05	4.18	90.53	14.39

田间试验结果表明, 能量传递规律与仿真结果相同, 油茶树枝条内部的能量传递规律与各级枝之间的能量传递规律保持一致, 即越靠近激振位置, 能量峰值出现的时间越短。油茶树主干 A、一级侧枝 B1、B2 和二级侧枝 C1、C2 动能的平均值分别为 2.73、13.68、8.98、22.05、4.18 J, 与仿真结果的相对误差分别为 7.34%、9.37%、6.81%、7.86% 和 9.39%。油茶果脱落率平均值为 90.53%, 花苞脱落率平均值为 14.39%, 采摘效果较好, 说明此参数组合满足机械化收获要求。

田间试验时, 油茶树各级枝的动能明显低于仿真结果, 其可能的原因: 优化后的参数组合经过修改, 会对试验结果造成一定误差; 通过振动等效模型得到的能量传递的结果是理想状态下的, 而田间的情况相当复杂, 树体的长势、形状、枝叶的浓密程度将影响试验结果。但是田间试验和仿真结果的相对误差均在 10% 之内, 说明优化后的振动参数具有较好的可靠性, 表明此振动等效模型具有较高的准确性。

4 结论

(1) 建立了 5 自由度油茶树的质量-弹性-阻尼动力学模型, 包括 1 个主干, 2 个一级侧枝和 2 个二级侧枝; 通过绳拉试验使树枝自由衰减的方法测量油茶树主干 A、一级侧枝 B1、B2 和二级侧枝 C1、C2 的阻尼比分别为 0.408 3、0.134 3、0.061 4、0.091 4、

0.080 1,进而得到了仿真试验所需的等效参数。

(2)运用 Matlab 软件中的 Simulink 组件建立微分运动方程的仿真框图,将不同的振动时间、频率和振幅下的作用力作为仿真的输入进行仿真分析。结果表明,能量由二级侧枝 C1 传递到 C2 的过程中损失 80.9%。从输入位置沿着传递路径,各级枝的动能峰值出现的时间具有滞后性。

(3)利用 Design-Expert 11.0.4 软件设计二次旋转正交组合试验,仿真试验结果表明,不同激振参数对油茶树能量传递特性的影响较大。建立各因素与指标之间的回归模型并进行方差和响应面分析;根据油茶树各级枝间的能量传递损失严重,完成一棵

树的油茶果采摘将进行 2~3 次振动,并对激振参数进行优化求解,得到最佳振动参数组合为振动时间 7.14 s、振动频率 7.18 Hz、振幅 52.41 mm。

(4)田间试验结果表明,油茶树各级枝间以及各级枝条内部的能量传递规律相同。能量沿着树枝传递时,动能与传递距离成反比,传递的距离越远能量越小;且越靠近激振位置,能量峰值出现的时间越短。通过验证,田间试验结果与仿真结果的相对误差在 10% 以内,说明该动力学模型具有较高的可靠性;振动采摘部分油茶果实和花苞平均脱落率分别为 90.53%、14.39%,采摘效果较好,证明了从能量传递角度优化振动参数方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] 曹瑞兰,李知青,欧阳雯婷,等.油茶 NAC 基因鉴定及对干旱胁迫响应分析[J].江西农业大学学报,2021,43(6):1357-1370.
CAO Ruilan, LI Zhiqing, OUYANG Wenting, et al. Identification of NAC gene and its response to drought stress in *Camellia oleifera*[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2021,43(6):1357-1370. (in Chinese)
- [2] 杨瑾,王忠伟,庞燕.基于熵权 TOPSIS 法的油茶产业发展绩效评价[J].中南林业科技大学学报,2021,41(12):168-177.
YANG Jin, WANG Zhongwei, PANG Yan. Evaluation of development performance of oil tea industry based on entropy weight TOPSIS method[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2021,41(12):168-177. (in Chinese)
- [3] 魏征,郭咪咪,王雅朦,等.油茶籽油多酚化合物研究进展[J].食品科学,2021,42(3):311-320.
WEI Zheng, GUO Mimi, WANG Yameng, et al. Recent advances in research on polyphenol compounds in *Camellia oleifera* seed oil[J]. Food Science, 2021, 42(3): 311-320. (in Chinese)
- [4] 周丁扬,吴建桥,文雯,等.粮食主产区河南省耕地撂荒特征与影响因素分析[J].农业机械学报,2021,52(8):127-137.
ZHOU Dingyang, WU Jianqiao, WEN Wen, et al. Abandonment characteristics and influencing factors of cultivated land abandonment in major crop-producing areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(8):127-137. (in Chinese)
- [5] 王伟伟,陈黎卿,杨洋,等.农业机械底盘技术研究现状与展望[J].农业机械学报,2021,52(8):1-15.
WANG Weiwei, CHEN Liqing, YANG Yang, et al. Development and prospect of agricultural machinery chassis technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(8):1-15. (in Chinese)
- [6] 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)
- [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].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)
- [8] 杨会民,散望龙,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)
- [9] 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.
- [10] 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].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(5):1-21. (in Chinese)
- [11] HE L, ZHOU J, DU X, et al. Energy efficacy analysis of a mechanical shaker in sweet cherry harvesting[J]. Biosystems Engineering, 2013, 116(4): 309-315.
- [12] SOLA-GUIRADO R R, BERNARDI B, CASTRO-GARCIA S, et al. Assessment of aerial and underground vibration transmission in mechanically trunk shaken olive trees[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 49(3): 191-197.
- [13] DU X, CHEN D, ZHANG Q, et al. Dynamic responses of sweet cherry trees under vibratory excitations[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(3): 305-314.
- [14] 李斌,陆华忠,吕恩利,等.荔枝树枝能量传递特性与去梗式振动采摘作业参数[J].农业工程学报,2018,34(8):18-25.
LI Bin, LU Huazhong, LÜ Enli, et al. Characterizing energy transfer of litchi branches and working parameters of destemmed

- vibrational picking[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(8):18-25. (in Chinese)
- [15] LÁNG Z, CSORBA L. A two degree of freedom damped fruit tree model[J]. Agricultural Engineering International; CIGR Journal, 2015, 17(3):335-341.
- [16] LÁNG Z. A one degree of freedom damped fruit tree model[J]. Trans. ASABE, 2008,51(3):823-829.
- [17] 刘晓雯,郭彩玲. 基于振动采摘的苹果树枝干动力学特性[J]. 林业工程学报,2021,6(3):120-126.
LIU Xiaowen, GUO Cailing. Study on dynamic characteristics of apple tree branches based on vibration picking[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021,6(3):120-126. (in Chinese)
- [18] 魏庭鹏,王春耀,闵磊,等. 基于 Matlab 对“Y 型”果树振动共振频率的研究[J]. 江苏农业科学,2017,45(3):169-172.
WEI Tingpeng, WANG Chunyao, MIN Lei, et al. Research on vibration resonance frequency of “Y-shaped” fruit trees based on Matlab[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017,45(3):169-172. (in Chinese)
- [19] 林欢,许林云,宣言,等. 基于集中质量的银杏树动力学建模研究[J]. 中国农机化学报,2019,40(11):81-88.
LIN Huan, XU Linyun, XUAN Yan, et al. Dynamics modeling of ginkgo tree based on mass concentration[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019,40(11):81-88. (in Chinese)
- [20] KENNETH R J, NICHOLAS H, PETER K A. Mechanical stability of trees under dynamic loads[J]. American Journal of Botany,2006, 93(10):1522-1530.
- [21] 黄强. 结合树木分枝方式构建树木骨架方法研究[D]. 保定:河北农业大学,2019.
HUANG Qiang. Tree skeleton construction based on tree branching[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [22] 唐宇航,陈志坚,梅志远,等. 数值计算结合试验测定模态阻尼法[J]. 振动与冲击,2017,36(4):32-40.
TANG Yuhang, CHEN Zhijian, MEI Zhiyuan, et al. A method based on numeral calculation and experiment for determination of modal damping[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(4):32-40. (in Chinese)
- [23] 贺磊盈. 面向振动采收的果树树枝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 Leiyang. Study on three-dimensional reconstruction method and dynamic characteristics of fruit tree branches for vibration harvesting[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-tech University,2014. (in Chinese)
- [24] 陈志健. 面向机械振动采收的油茶树冠层识别与分析[D]. 合肥:安徽农业大学,2021.
CHEN Zhijian. Identification and analysis of *Camellia oleifera* canopy for mechanical vibration harvesting[D]. Hefei: Anhui Agricultural University,2021. (in Chinese)
- [25] 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)
- [26] 黎明安. MATLAB/Simulink 动力学系统建模与仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- [27] 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 parameters of camellia fruit based on double pendulum model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(12):96-104. (in Chinese)
- [28] 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)