doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.05.003

摇枝式加工型苹果采摘振动参数仿真优化与试验

杨　欣[1,2]　姜尊豪[1]　李建平[1,2]　谢金燕[1]　顾浩源[1]　边永亮[3]

(1. 河北农业大学机电工程学院, 保定 071001; 2. 河北省智慧农业装备技术创新中心, 保定 071001;
3. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 为探究不同振动参数组合对苹果采摘效果的影响,建立苹果树二级树枝振动力学模型,解析分析得到影响苹果脱落的主要因素为振动频率、振幅及夹持位置。测量苹果树形态特征并基于矮砧密植整形原理建立纺锤形苹果树三维模型,利用 ANSYS 软件对苹果树模型进行有限元仿真分析,仿真结果表明,振动频率 4 ~ 8 Hz、振幅 20 ~ 30 mm、夹持位置 0.35l ~ 0.65l(l 为二级树枝长度)时,对果树损伤较小且苹果易脱落。设计四因素三水平振动采摘试验,以确定苹果树不同位置树枝最佳的振动参数组合,利用 Design-Expert 软件对试验数据进行分析和响应面优化,参数优化结果为:采摘苹果树上层苹果时,振动频率为 5 Hz,振幅为 28 mm,夹持位置为 0.40l;采摘苹果树中层苹果时,振动频率为 4 Hz,振幅为 30 mm,夹持位置为 0.43l;采摘苹果树下层苹果时,振动频率为 8 Hz,振幅为 20 mm,夹持位置为 0.65l;通过验证试验得到苹果树上层、中层、下层摘净率为 96.4%、94.8%、93.2%,与优化值相近,表明优化模型可靠。

关键词: 加工型苹果; 振动采摘; 参数优化; 有限元仿真

中图分类号: S224.93　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2024)05-0028-12　　**OSID**:

Simulation Optimization and Experiment of Vibration Parameters of Apple Picking by Shaking Branch Processing

YANG Xin[1,2]　JIANG Zunhao[1]　LI Jianping[1,2]　XIE Jinyan[1]　GU Haoyuan[1]　BIAN Yongliang[3]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hebei Agricultural University*, *Baoding* 071001, *China*
2. *Technology Innovation Center of Intelligent Agricultural Equipment*, *Baoding* 071001, *China*
3. *College of Biosystems Engineering and Food Science*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310058, *China*)

Abstract: In order to investigate the influence of different positions of apple tree branches on the picking effect under different combinations of vibration parameters, the main factors affecting the apple drop were obtained as vibration frequency, amplitude and holding position through the establishment of a secondary branch vibration mechanics model of the apple tree and analytical analyses. Measuring the morphological characteristics of apple trees and based on the principle of dwarf anvil dense planting shaping to establish a three-dimensional model of fusiform apple trees, using ANSYS software to carry out finite element simulation analysis of the apple tree model, the simulation results showed that the vibration frequency of 4 ~ 8 Hz, amplitude of 20 ~ 30 mm, the holding position of 0.35l ~ 0.65l (l was the length of secondary branches), the damage to the fruit tree was small and easy to fall off the apples. In order to determine the best combination of vibration parameters for different positions of branches in apple trees, a four-factor, three-level field experiment was designed, and the experimental data were analyzed and response surface was optimized by using Design-Expert software, and the results of the parameter optimization were as follows: when picking apples on the upper layer of the apple tree, the vibration frequency was 5 Hz, the amplitude was 28 mm, and the clamping position was 0.40l. When picking apples in the middle layer of the apple tree, the vibration frequency was 4 Hz, the amplitude was 30 mm, and the clamping position was 0.43l; when picking apples from the lower layer of the apple tree, the vibration frequency was 8 Hz, the amplitude was 20 mm, and the clamping position was 0.65l; it can be seen through the validation test

收稿日期: 2023 - 10 - 08　修回日期: 2023 - 12 - 02

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS - 27)和河北省现代农业产业技术体系苹果建设专项资金项目(HBCT2024150202)

作者简介: 杨欣(1974—),男,教授,主要从事现代农业装备设计研究,E-mail: yangxin@hebau.edu.cn

that the picking rates of the upper to the lower layer of the apple tree were 96.4%, 94.8%, and 93.2%, which were similar to the optimized values, indicating that the optimized model was reliable.
Key words: processed apple; vibration picking; parameter optimization; finite element simulation

0　引言

近年来苹果加工产业迅速发展,年产量中有5.1%的苹果进行深加工[1]。苹果加工果的收获多采用人工采摘,采摘效率低,劳动强度大。利用振动原理采摘果实是林果收获的有效方式之一,分析研究不同振动采摘参数对林果收获效果的影响尤为重要[2-3]。

LIU 等[4]研究了柑橘的振动理论,证明了通过振摇树冠采摘果实的可行性;SAFDARI 等[5]利用自制惯性型便携式激振器进行扁桃树振动采摘试验,在相同振幅下研究发现振动频率和振动时间对扁桃的脱落率有显著影响;HOSHYARMANESH 等[6]建立了橄榄树有限元模型并进行仿真分析,确定了最佳的橄榄采收参数组合,验证了林果振动采收仿真的可行性。杜小强等[7]针对非圆周激励中不同类型旋轮线轨迹进行研究,根据最优轨迹设计了由平面 5R 并联机构驱动的二自由度树冠振动装置,提高了油茶果的采收效率;伍德林等[8]建立 5 自由度油茶果的质量-弹性-阻尼动力学模型,分析不同参数组合条件下各级枝之间能量传递,确定了振动过程中能量传递规律以及最佳激振参数;散鋆龙等[9]建立了杏果实-果枝双摆动力学模型,通过高速摄像仪分析果实受迫振动脱落的全过程,确定了杏果实脱落不同阶段瞬时响应状态和运动状态。

为探究苹果树不同位置树枝最佳的振动采摘参数组合对苹果机械采摘效果的影响,指导苹果振动采摘机设计,本文通过建立苹果树二级树枝振动力学模型,分析影响苹果脱落的主要因素。根据矮砧密植整形原理及果树形态特征,利用 ANSYS 建立纺锤形苹果树有限元模型并进行有限元仿真分析,确定苹果树二级树枝受迫振动采摘参数范围。利用四因素三水平正交试验方法进行田间试验,通过响应面分析,得到苹果树不同位置处苹果振动采收最佳参数组合,并进行田间验证试验,以期为苹果振动采摘机械研制提供理论基础。

1　纺锤形苹果树有限元模型构建

为建立纺锤形苹果树三维模型及确定仿真参数,针对嘎啦品种苹果的振动采摘,于 2023 年 3 月 20 日在河北省保定市苹果病虫害防控教学科研试验园选取苹果树样本,并对选取的苹果树分别进行形态特征测量和物理特性试验。

1.1　纺锤形苹果树形态特征测量

随机选取 5 棵具有代表性的苹果树进行形态特征测量,采用得力高精度钢卷尺测量苹果树高度及各级树枝长度;采用 DL-305 300 型数显角度尺测量相邻二级树枝生长夹角及各级树枝相对上一级树枝的生长角度;采用 MNT-150 型游标卡尺分别测量主干及各级树枝根部连接处、树枝中部及树枝末端直径,计算各级树枝直径变化率[10]。以各项测量数据平均值作为纺锤形苹果树形态特征参数,如表 1 所示。

表 1　纺锤形苹果树形态特征参数

Tab.1　Morphological characteristic parameters of spindle shaped apple trees

参数	数值	参数	数值
主干高度/cm	260	主干直径/cm	4.6
二级树枝长度/cm	95	二级树枝直径/cm	3.7
三级树枝长度/cm	31	三级树枝直径/cm	0.8
主干直径变化率	0.019 8	二级树枝直径变化率	0.021 2
三级树枝直径变化率	0.015 6	相邻二级树枝生长夹角/(°)	120
二级树枝相对主干夹角/(°)	78	三级树枝相对二级树枝夹角/(°)	65

1.2　纺锤形苹果树物理参数测定

分别随机选取 15 个具有代表性的二级树枝及三级树枝,用果枝剪进行树枝取样,取样树枝长度 10 cm,采用保鲜膜进行封存。进行物理试验,获取相关数据,弹性模量、切变模量及果枝密度计算公式为

$$\begin{cases} E = \dfrac{4Pl_0^3}{3\varepsilon\pi d^4} \\ K = \dfrac{E}{2(\mu+1)} \end{cases} \tag{1}$$

$$\rho = \frac{m_1}{V} \tag{2}$$

式中　P——压力,N

l_0——取样树枝长度,mm

E——弹性模量,MPa

K——切变模量,MPa

d——取样树枝直径,mm

ε——压弯应变,%

μ——泊松比

ρ——树枝密度,g/cm^3

m_1——取样树枝质量,kg

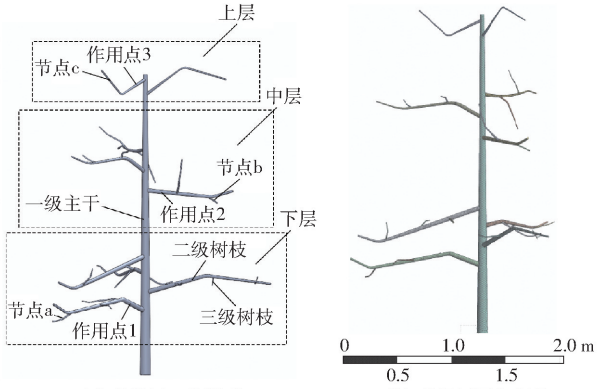
V——树枝体积,cm^3

弹性模量采用三点弯曲试验法获得,通过 MNT-150 型游标卡尺和衡翼 HY-0580 型电子万能材料试验机,获得二级树枝及三级树枝的直径、压力及应变数据各 15 组,代入式(1)取结果的平均值,得到二级树枝及三级树枝的弹性模量分别为 435.856、286.794 MPa。已知苹果树二级树枝的弹性模量大约为一级主干的 80%[11],可知苹果树主干的弹性模量为 544.82 MPa。由于木材的泊松比介于 0.3~0.5 之间[12],因此取苹果树各级树枝的泊松比为 0.35,得到一级主干、二级树枝和三级树枝的切变模量分别为 201.785、161.42、106.22 MPa。

为获得结果枝密度,使用 HZY-1000 型电子天平和 100 mL 量筒,采用称量法及排水法分别获得 15 组结果枝的质量及体积数据,代入式(2),计算 15 组试验结果的平均值,得到二级树枝的密度为 0.873 7 g/cm^3。

1.3 纺锤形苹果树有限元模型

根据上述果树形态特征统计结果的平均值以及纺锤形苹果树矮砧密植整形原理,将苹果树树体模型简化为主干疏层形[13],苹果树二级树枝分为 3 层,下层 4 根二级树枝、中层 3 根二级树枝、上层 2 根二级树枝,主干及其各级树枝简化为由粗变细的圆锥体,利用 Solidworks 2020 软件建立由一级主干、二级树枝以及三级树枝组成的苹果树三维模型,如图 1a 所示。由已构建的果树模型,挑选不同位置处具有代表性的二级树枝,利用仿真软件研究 3 个作用点在不同振幅下受正弦振动激励时沿各个枝干相应 3 个检测位置(节点)的谐响应状态。



(a) 苹果树三维模型 (b) 苹果树网格划分

图 1 纺锤形苹果树有限元模型

Fig. 1 Finite element models of spindle shaped apple tree

2 苹果树二级树枝受迫振动理论分析

2.1 振动装置结构及工作原理

振动装置依靠曲柄滑块机构产生周期性外力从而使苹果脱落。振动装置由蓄电池、变频器、固定架、频率调节开关、变频电机、偏心圆盘、连杆、作动杆、软轴、手动夹紧机构、活动装夹块、固定装夹块等构成,其总体结构如图 2 所示。

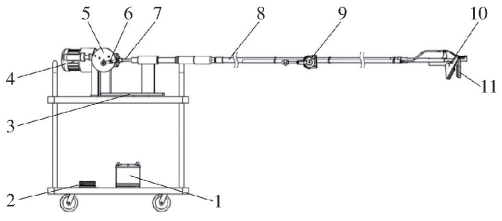


图 2 振动装置结构图

Fig. 2 Vibration device structure diagram

1. 蓄电池 2. 变频器 3. 固定架 4. 变频电机 5. 偏心圆盘 6. 连杆 7. 作动杆 8. 软轴 9. 手动夹紧机构 10. 活动装夹块 11. 固定装夹块

振动装置以曲柄滑块机构为依托,手动夹紧机构、活动装夹块和固定装夹块组成夹持机构。装置作业时,手持夹持机构移动到合适位置,以便夹持苹果树树枝,偏心圆盘由变频电机驱动,由作动杆带动软轴运动,软轴带动夹持机构及树枝沿软轴轴线进行往复运动,实现树枝的受迫振动。通过变频电机控制偏心圆盘转速改变振动装置的振动频率,通过连杆连接偏心圆盘不同位置偏心孔改变振动装置的振幅。当苹果受迫振动产生的惯性力大于苹果果柄与树枝联接力时,苹果与树枝分离。

2.2 苹果树二级树枝受迫振动动力学模型建立

以二级树枝和一级主干连接处 O 为坐标原点,Y 为二级树枝竖直运动方向,X 为二级树枝水平运动方向,t 为振动时间,建立苹果树二级树枝振动力学模型,如图 3 所示。

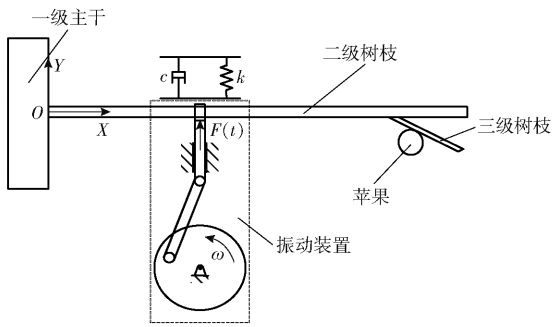


图 3 苹果树二级树枝振动力学模型

Fig. 3 Mechanical model of secondary branch vibration of apple trees

由振动装置工作原理,结合苹果树二级树枝振动力学模型及牛顿第二定律可知,二级树枝在振动过程中受到 Y 方向的持续性周期外力 $F(t)$,在 X 方向无外力施加,即在 X 方向受力为零。据此,二级树枝产生的惯性力为

$$\begin{cases} F_Y = \left(M_1 + \sum M_2 + \sum M_3\right)\dfrac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} \\ F_X = 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中　F_Y——二级树枝在 Y 方向上产生的惯性力，N

F_X——二级树枝在 X 方向上产生的惯性力，N

M_1——二级树枝等效质量，kg

$\sum M_2$——三级树枝等效总质量，kg

$\sum M_3$——果实等效总质量，kg

y——二级树枝在 Y 方向上的位移，mm

树枝在振动过程中会受到持续性周期外力，持续性周期外力 $F(t)$ 可表示为

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t) \tag{4}$$

式中　F_0——外力振幅，mm

ω——偏心圆盘角速度，rad/s

角速度与转速关系为

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \tag{5}$$

式中　n——偏心圆盘工作转速，r/min

对苹果树二级树枝进行受力分析，苹果树二级树枝受迫振动微分方程一般形式为

$$M\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} + c\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} + ky = F_0 \sin(\omega t) \tag{6}$$

其中
$$M = M_1 + \sum M_2 + \sum M_3 \tag{7}$$

式中　M——苹果树被夹持树枝等效总质量，kg

c——二级树枝阻尼系数，N·s/m

k——二级树枝弹性系数，N/m

为简化苹果树二级树枝受迫振动微分方程，式(6)两边同时除以 M，整理可得

$$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} + 2\xi\omega_n \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} + \omega_n^2 y = y_{st}\omega_n^2 \sin(\omega t) \tag{8}$$

其中
$$2\xi\omega_n = \frac{c}{M} \tag{9}$$

$$\omega_n^2 = \frac{k}{M} \tag{10}$$

$$y_{st} = \frac{F_0}{k} \tag{11}$$

式中　ω_n——无阻尼系统的固有频率，Hz

ξ——阻尼比

y_{st}——系统在简谐力作用下的静变形量，mm

2.3　苹果树二级树枝受迫振动动力学模型求解

为进一步对苹果树二级树枝受迫振动微分方程进行求解，可将振动装置使树枝-苹果系统产生的振动看作线性系统在简谐力激励下的受迫振动，由文献[14]可知，振动微分方程初始条件为

$$\begin{cases} y(0) = y_0 \\ \dfrac{\mathrm{d}y(0)}{\mathrm{d}t} = \dfrac{\mathrm{d}y_0}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{12}$$

式中　$y(0)$——简谐力的作用时间无限趋近于零时二级树枝所产生的位移，mm

设振动微分方程对应的齐次方程通解 y_1 和特解 y_2 分别为

$$\begin{cases} y_1 = \mathrm{e}^{-\xi\omega_n t}(C_1\cos(\omega_d t) + C_2\sin(\omega_d t)) \\ y_2 = S\sin(\omega t - \psi) \end{cases} \tag{13}$$

其中
$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\xi^2} \tag{14}$$

式中　C_1、C_2——常数

ω_d——有阻尼系统固有角频率，Hz

ψ——初始相位角，(°)

S——苹果树二级树枝振动时最大位移，mm

根据微分方程理论，将式(12)、(13)代入式(8)，得到振动微分方程全解 y 为

$$\begin{aligned} y = {} & \mathrm{e}^{-\xi\omega_n t}\left(y_0\cos(\omega_d t) + \frac{\dfrac{\mathrm{d}y_0}{\mathrm{d}t} + \xi\omega_n y_0}{\omega_d}\sin(\omega_d t)\right) + \\ & S\mathrm{e}^{-\xi\omega_n t}\left(\sin\psi\cos(\omega_d t) + \frac{\xi\omega_n\sin\psi}{\omega_d}\sin(\omega_d t)\right) + \\ & S\left(\sin(\omega t - \psi) - \frac{\mathrm{e}^{-\xi\omega_n t}\omega\cos\psi}{\omega_d}\sin(\omega_d t)\right) \end{aligned} \tag{15}$$

将 y_2 代入式(8)，二级树枝振动时最大位移 S 为

$$S = \frac{y_{st}}{\sqrt{(1-\overline{\omega}^2)^2 + 4\xi^2\overline{\omega}^2}} \tag{16}$$

其中
$$\overline{\omega} = \frac{\omega_0}{\omega_n} \tag{17}$$

式中　ω_0——外部激励力频率，Hz

将二级树枝振动模型简化为一端固定悬臂梁模型，如图 4 所示。

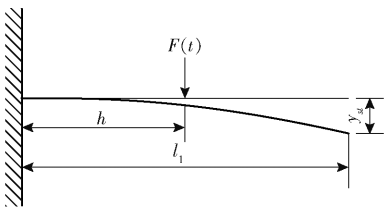


图 4　一端固定悬臂梁模型

Fig. 4　Model of fixed cantilever beam at one end

根据悬臂梁静变形公式[15]，简谐力作用下树枝的静变形量 y_{st} 可表示为

$$y_{st} = \frac{F(t)h^2(3l_1 - h)}{6E_1 J} \tag{18}$$

式中　h——夹持位置到一级主干的距离(夹持位置)，mm

J——树枝弯曲截面惯性矩，cm^4

l_1——静变形量测量点到一级主干的距离，cm

E_1——二级树枝弹性模量，MPa

随着果实成熟期的增加,果实与树枝的联接力逐渐减小[16]。在采摘过程中,振动能量沿着苹果树各级树枝传递给果实。假设二级树枝与三级树枝、果实均无相对位移,则各级树枝振动位移 y 及果实振动位移 y_f[17]为

$$y_f = y = S\sin(\mathrm{t}\omega t) \tag{19}$$

式中 t——常数

由麦克斯韦相异假说,在 j 处激励引起的 b 处响应等于在 b 处激励引起的 j 点响应[18],树枝振动所传递的能量应满足

$$Q_j^b = Q_b^j \tag{20}$$

但在振动过程中,由于树枝自身的弹性力和阻尼力以及外部空气阻力,树枝在振动过程中所传递的能量小于振动装置输入的能量,振动过程中树枝传递给苹果的能量 Q 为

$$Q = Q_F - Q_c - Q_k - Q_a \tag{21}$$

式中 Q_F——振动装置输入总能量,J

Q_c——树枝内部阻尼消耗能量,J

Q_k——抵抗树枝弹性恢复力消耗能量,J

Q_a——空气阻力消耗能量,J

综合考虑树枝-苹果系统在振动过程中的能量变化,由动能定理得

$$Q = \frac{1}{2}M_1\left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \frac{1}{2}\sum M_2\left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \frac{1}{2}I_c\left(\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \frac{1}{2}\sum M_3\left(\frac{\mathrm{d}y_f}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \frac{1}{2}\sum M_3\left(R\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\right)^2 \tag{22}$$

式中 I_c——苹果转动惯量,kg·m^2

θ——苹果摆动角,(°)

R——苹果重心与果枝连接处的距离,mm

将式(19)~(21)代入式(22)得到

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \sqrt{\frac{2QZ^2 - F_0^2\omega^2H^2MN_1^2}{TZ^2}} \tag{23}$$

其中

$$H = h^2(3l_1 - h) \tag{24}$$

$$T = \sum M_3R^2 + I_c \tag{25}$$

$$Z = 6EJ\sqrt{(1-\overline{\omega}^2)^2 + 4\xi^2\overline{\omega}^2} \tag{26}$$

$$N_1 = \cos(\omega t)\sin(\mathrm{t}\omega t) + \mathrm{t}\cos(\mathrm{t}\omega t)\sin(\omega t) \tag{27}$$

对式(23)求导可得

$$\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} = \frac{F_0^2\omega^2H^2MN_2N_1}{\sqrt{2QTZ^4 - F_0^2\omega^2H^2TZ^2MN_1^2}} \tag{28}$$

其中

$$N_2 = (\mathrm{t}^2\omega + \omega)\sin(\omega t)\sin(\mathrm{t}\omega t) - 2\mathrm{t}\omega\cos(\mathrm{t}\omega t)\cos(\omega t) \tag{29}$$

2.4 苹果-树枝分离影响因素

以苹果果柄与树枝连接处 O' 为坐标原点建立坐标系,苹果动力学分析如图 5 所示。在振动过程中,苹果受到自身重力 G、惯性力 F 和果柄拉力 F_N 作用。由达朗贝尔原理,惯性力 F 可分解为使苹果产生沿果柄轴向拉力的法向惯性力 F_n和对果柄与树枝连接处产生力矩的切向惯性力 F_t。同理加速度也可分解为与力反向的法向加速度 a_n和切向加速度 a_t。

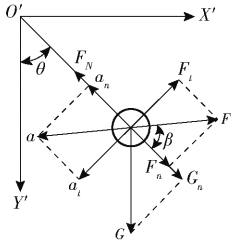


图 5 苹果动力学分析

Fig. 5 Apple dynamics analysis

由图 5 可知,苹果法向惯性力 F_n和切向惯性力 F_t分别为

$$\begin{cases} F_n = ma_n = mR\left(\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\right)^2 \\ F_t = ma_t = mR\dfrac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} \end{cases} \tag{30}$$

式中 m——苹果质量,kg

当苹果振动脱落时,主要考虑苹果重力 G 在果柄上的分力 G_n和惯性力在果柄上的分力 F_n[19],苹果脱落应当满足

$$F_n + G_n > F_N \tag{31}$$

式中 F_N——苹果果柄与树枝的联接力,N

即苹果脱落时,苹果获得的瞬时加速度应当满足

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_t^2} > \frac{F_N - G_n}{m\cos\beta} \tag{32}$$

式中 β——惯性力与果柄轴线方向夹角,(°)

将式(30)代入式(32)可得

$$a = \sqrt{\frac{R^2(2QZ^2 - F_0^2\omega^2H^2MN_1^2)^2}{T^2Z^4} + \frac{R^2F_0^4\omega^4H^4M^2N_2^2N_1^2}{2QTZ^4 - F_0^2\omega^2H^2TZ^2MN_1^2}} > \frac{F_N - G_n}{m\cos\beta} \tag{33}$$

由式(33)可知,影响苹果脱落的主要因素有外力的振幅、频率和夹持位置。外力的频率越大,苹果获得的瞬时加速度 a 越大,苹果越易脱落;当外力的作用点越靠近苹果时,树枝传递给苹果的能量越接近外力输入的能量,即 Q 越大,苹果越易脱落;外力的振幅越大,振动效果越好,但振幅越大,各级树枝的变形越大,越易对树枝造成损伤。由于苹果大多数直接生长在二级树枝中后部或者次级树枝中后部,当夹持位置处的二级树枝较细或者夹持位置离

三级树枝较近时，过大的振幅和振动频率易折断树枝。因此在实际采摘过程中，选择合适的外部频率、振幅和夹持位置，既能保护果树，还能提高采摘成功率，降低果枝损伤。

3　苹果树二级树枝受迫振动仿真分析

选取 15 棵长势较好，果实负载量适中、树枝上果实分布均匀的嘎啦果树进行预试验。预试验采用控制变量法，设计振动频率、全振幅及夹持位置 3 组振动采摘试验，当因素不变时其水平为：振动频率 8 Hz、全振幅 50 mm、夹持位置距离一级主干 0.50l。试验时利用振动装置夹持二级树枝，分别针对果树上、中、下 3 层的苹果进行振动采摘，控制振动装置的振动频率范围 1 ~ 20 Hz（间隔 1 Hz），全振幅范围 25 ~ 80 mm（间隔 5 mm），夹持机构的夹持位置范围 0.10l ~ 0.80l（间隔 0.05l）。试验前统计二级树枝上苹果个数，试验结束后统计脱落的苹果个数并记录二级树枝损伤情况。根据预试验，当振动频率小于 2 Hz，二级树枝全振幅小于 30 mm 或夹持位置距离一级主干小于 0.15l 时，苹果均极难脱落（苹果摘净率小于 30%）；当振动频率大于 15 Hz，树枝全振幅大于 70 mm 或夹持位置距离一级主干大于 0.75l 时，果树上层树枝易折断损伤。因此振动装置振动频率范围为 3 ~ 14 Hz，二级树枝全振幅范围为 40 ~ 60 mm，夹持位置与一级主干的距离范围为 0.25l ~ 0.65l。为获得最优振动参数，设计仿真试验，并基于树枝全振幅范围设计偏心圆盘，确定偏心孔位置。

3.1　偏心圆盘偏心孔位置设计

本文振动装置采用对心式曲柄滑块机构，机构简图如图 6 所示，该机构极位夹角为 0°，具有运行平缓、冲击力小的特点[20]。

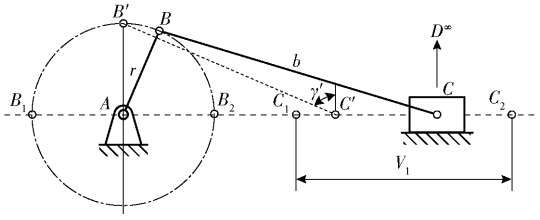


图 6　对心式曲柄滑块机构简图

Fig. 6　Schematic of centering crank slider mechanism

当连杆长度 b = 100 mm 时，根据图 6，由平面四杆机构杆长条件可知[21]

$$r \leqslant b = 100 \text{ mm} \tag{34}$$

式中　r——偏心孔圆心到旋转中心 A 的距离，mm

当偏心孔运动到 B'时存在最小传动角，且随着 r 的增大而减小，最小传动角 γ'应满足[22]

$$\gamma' = \arccos\frac{r}{b} \geqslant 50° \tag{35}$$

根据图 6，二级树枝全振幅 V_1 为[23]

$$V_1 = 2r \tag{36}$$

由式（36）可知，当二级树枝全振幅为 40 ~ 60 mm 时，偏心孔圆心到旋转中心的距离（振幅范围）为 20 ~ 30 mm。根据式（34）、（35），偏心孔位置范围满足平面四杆机构杆长条件，且当 r = 30 mm 时，机构最小传动角 γ' = 72.54° > 50°，符合设计要求，传力性能好。

综上所述，依据偏心圆盘偏心孔位置设计结果，试验时振幅范围为 20 ~ 30 mm，选择振幅因素水平为 20、25、30 mm。

3.2　苹果树二级树枝线性静态结构分析

将纺锤形果树模型导入 ANSYS Workbench 2021，利用软件中的静态结构模块对下层第 4 根二级树枝进行分析，根据上述弹性模量、密度、泊松比等试验数据，赋予苹果树各部分树枝不同的材料属性。采用四面体方法的中等精度网格进行划分，将地面与苹果树接触部分设置为固定端约束，二级树枝与三级树枝则为自由端，如图 1b 所示。

当振幅为 25 mm，偏心圆盘转速为 500 r/min 时，根据式（4）、（5），分别在二级树枝距离一级主干 0.25l、0.50l 及 0.65l 处施加 $F(t)$ 的周期外力，求解出二级树枝的变形云图如图 7 所示。

由图 7 可知，当夹持位置在 0.25l 处，整个二级树枝模型变形较小，且夹持位置在 0.25l 处果树一级主干的最大变形均大于夹持位置在 0.50l、0.65l 处果树一级主干的最大变形。由此，夹持位置与果树一级主干的变形呈现负相关，夹持位置越靠近一级主干越易对苹果树树体造成损伤。当夹持位置在 0.50l、0.65l 处，二级树枝变形明显增大，且最大变形发生在二级树枝末端与三级树枝上，此时采摘效果较好；根据二级树枝变形云图，二级树枝最大变形与夹持位置呈现正相关，夹持位置距一级主干越远二级树枝变形越大，但过大的变形极易折断二级树枝，损伤果树。因此，夹持位置应接近二级树枝中部，既能减小果树一级主干及二级树枝的变形，避免果树树体损伤，又能保证整个二级树枝有较大变形，提高苹果的采摘成功率。

根据仿真结果夹持位置范围区间取二级树枝 0.35l ~ 0.65l 处，选择夹持位置因素水平为 0.35l、0.50l、0.65l。

3.3　苹果树二级树枝受迫振动谐响应分析

进行苹果树自由振动模态分析。苹果成熟时果柄与树枝联接力最弱，苹果通过苹果树树枝产生共振进行采摘能够带来较为理想的效果[24-25]。为得到苹果树共振时较为精确的固有频率，采用上述材

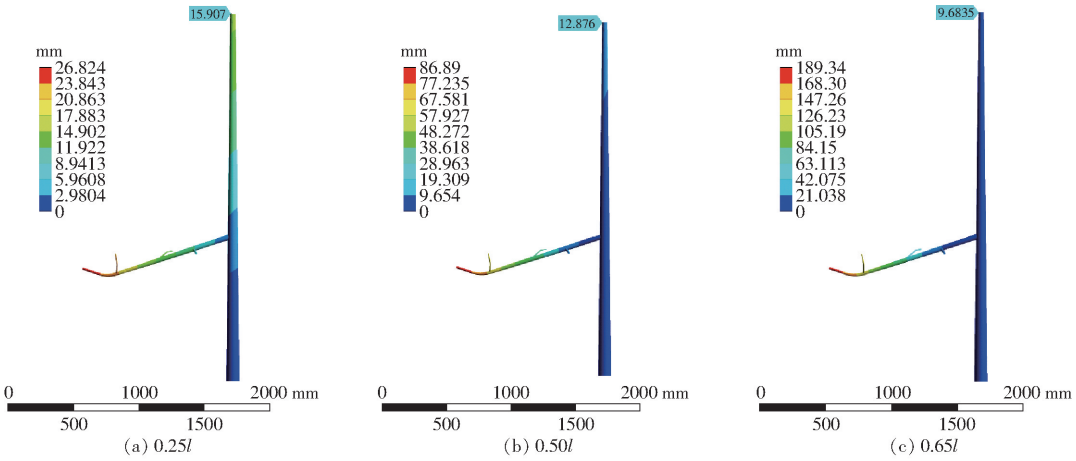


图 7 二级树枝变形云图

Fig. 7 Secondary tree branch deformation cloud maps

料属性、约束条件等设置对苹果树进行 1 ~ 50 阶模态分析，模态频率为 1.58 ~ 17.38 Hz。图 8 为 6 个具有代表性的模态响应云图。

分析苹果树典型自由模态云图可知，前 19 阶模态部分树枝末端均有较为明显的变形响应性，但整体上位移量较小；33 阶模态部分树枝末端响应较大，树枝末端变形响应最大；当振动频率达到 14.578 Hz 的 40 阶模态时，各级树枝末端变形响应明显，均有明显位移；当模态达到 48 阶时，部分树枝变形严重，此时极易折断树枝，损伤果树。因此，进行谐响应分析时，设置频率 0 ~ 15 Hz 范围，寻找试验频率范围。

为确定苹果树二级树枝在受到正弦位移载荷（固定振幅）时的稳态响应，对纺锤形苹果树模型进行谐响应分析。在模态分析的基础上采用上述边界条件及频率范围，利用完全法求解，根据果树振动采

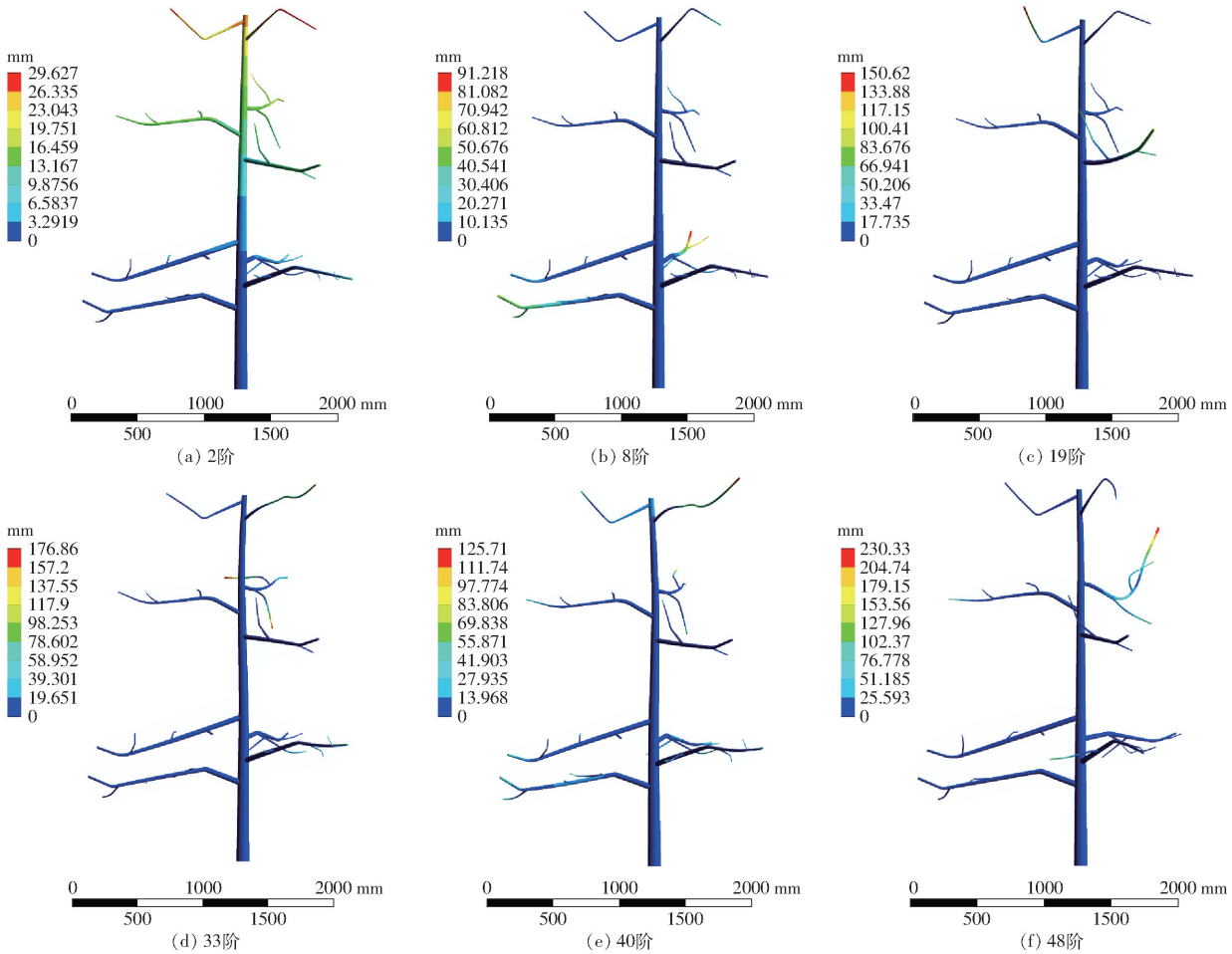


图 8 自由模态典型响应云图

Fig. 8 Free mode typical response cloud charts

收激振点振幅特性[12]对作用点 1、2、3 均施加 20、25、30 mm 的固定振幅，进行苹果树二级树枝的谐响应分析，得到节点 a、b、c 位置处的加速度–频率变化曲线，如图 9 所示。

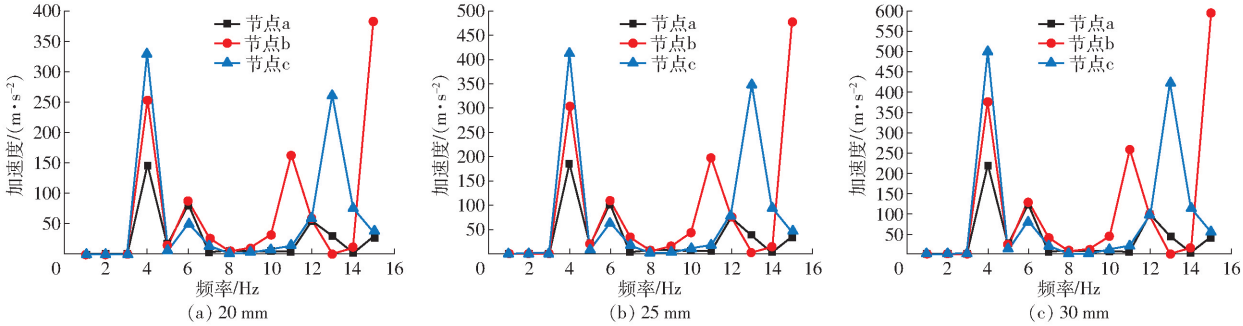


图 9　不同振幅激励下各节点加速度仿真曲线

Fig. 9　Simulation curves of acceleration at each node under different amplitude excitations

由图 9 可知，作用点振幅为 20、25、30 mm 时，在 1 ~ 3 Hz 频率范围内，各节点树枝加速度均较小。节点 a 在 4、6、12 Hz 时具有典型加速度峰值，节点 b 在 4、6、11、15 Hz 时具有典型加速度峰值，节点 c 在 4、6、13 Hz 时具有典型加速度峰值。各节点加速度随着振幅的增大而增大，但各节点处加速度–频率曲线整体变化规律一致。各节点在相同频率和相同振幅下加速度变化均有差异，但在 4 Hz 和 6 Hz 左右均有相同的典型加速度峰值。

为确定试验时的频率范围，有研究表明苹果分离时瞬时加速度应大于 49 m/s²[26]，为减小频率过大对苹果树造成的损伤并结合谐响应分析结果，试验时振动频率范围区间取 4 ~ 8 Hz，选择振动频率因素水平为 4、6、8 Hz。

4　苹果树二级树枝受迫振动田间试验

为获得苹果树不同位置树枝最佳的振动采收参数组合，根据苹果树二级树枝受迫振动原理和仿真分析结果，于 2023 年 9 月初在河北省保定市苹果病虫害防控教学科研试验园中进行振动采摘试验，当苹果成熟率达到 95% 时，利用振动装置分别对苹果树下、中、上 3 层的二级树枝施加激振力，进行振动试验，田间试验现场如图 10 所示。



图 10　田间试验现场

Fig. 10　Field test site

4.1　评价指标

依据实际生产中加工型苹果振动采摘的农艺要求，将苹果摘净率作为振动试验的主要评价指标。苹果摘净率 η 是指采收的成熟苹果占应采苹果的比例。

4.2　振动试验设计

选择振动频率 A、振幅 B、夹持位置 C 和振动位置 D 4 个试验因素，采用四因素三水平正交试验方法。根据仿真分析结果，因素编码如表 2 所示，共进行 29 组试验，试验结果如表 3 所示。

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Experimental factors and coding

编码	因素			
	振动频率 A/Hz	振幅 B/mm	夹持位置 C	振动位置 D
−1	4	20	0.35l	下层
0	6	25	0.50l	中层
1	8	30	0.65l	上层

4.3　试验结果与分析

4.3.1　方差分析

利用 Design-Expert 12.0 软件对振动频率、振幅、夹持位置、振动位置进行回归拟合，苹果振动采摘时摘净率 η 方差分析结果如表 4 所示。

由表 4 可知，苹果摘净率 η 的回归模型显著性检验 $P<0.001$，失拟项 $P=0.2339$，说明模型极显著，失拟不显著，拟合统计 $R^2=0.9515$，试验误差较小，模型的拟合程度高。对苹果摘净率的影响，B、C、D、AB、AD、BC、B^2、C^2、D^2 极显著（$P<0.01$），A、AC、CD、A^2 显著（$P\leqslant 0.05$）。根据方差分析结果，剔除不显著项，苹果摘净率 η 的回归模型为

$$\eta = -182.21 + 13.79A + 15.17B + 163.65C + 11.41D - 0.53AB + 5.83AC - 0.95AD - 3.67BC - 9.83CD - 0.32A^2 - 0.20B^2 - 97.04C^2 - 1.46D^2 \quad (37)$$

表 3 试验设计与结果

Tab. 3 Experimental design and results

试验号	因素				η/%
	A/Hz	B/mm	C	D	
1	4	20	0.50l	中层	82.5
2	8	20	0.50l	中层	90.2
3	4	30	0.50l	中层	95.3
4	8	30	0.50l	中层	81.8
5	6	25	0.35l	下层	84.9
6	6	25	0.65l	下层	92.3
7	6	25	0.35l	上层	90.8
8	6	25	0.65l	上层	92.3
9	4	25	0.50l	下层	88.1
10	8	25	0.50l	下层	89.2
11	4	25	0.50l	上层	95.2
12	8	25	0.50l	上层	88.7
13	6	20	0.35l	中层	80.4
14	6	30	0.35l	中层	88.1
15	6	20	0.65l	中层	89.2
16	6	30	0.65l	中层	85.9
17	4	25	0.35l	中层	91.5
18	8	25	0.35l	中层	88.4
19	4	25	0.65l	中层	89.2
20	8	25	0.65l	中层	93.1
21	6	20	0.50l	下层	85.9
22	6	30	0.50l	下层	87.8
23	6	20	0.50l	上层	87.2
24	6	30	0.50l	上层	89.5
25	6	25	0.50l	中层	93.1
26	6	25	0.50l	中层	94.8
27	6	25	0.50l	中层	93.4
28	6	25	0.50l	中层	92.5
29	6	25	0.50l	中层	94.2

表 4 苹果摘净率方差分析

Tab. 4 ANOVA of apple picking rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	419.33	14	29.95	19.62	<0.000 1 **
A	9.01	1	9.01	5.90	0.029 2 *
B	14.08	1	14.08	9.23	0.008 9 **
C	26.70	1	26.70	17.49	0.000 9 **
D	20.02	1	20.02	13.11	0.002 8 **
AB	112.36	1	112.36	73.60	<0.000 1 **
AC	12.25	1	12.25	8.02	0.013 3 *
AD	14.44	1	14.44	9.46	0.008 2 **
BC	30.25	1	30.25	19.82	0.000 5 **
BD	0.040 0	1	0.040 0	0.026 2	0.873 7
CD	8.70	1	8.70	5.70	0.031 6 *
A^2	10.89	1	10.89	7.13	0.018 3 *
B^2	160.28	1	160.28	104.99	<0.000 1 **
C^2	30.92	1	30.92	20.25	0.000 5 **
D^2	13.80	1	13.80	9.04	0.009 4 **
残差	21.37	14	1.53		
失拟项	18.07	10	1.81	2.19	0.233 9
纯误差	3.30	4	0.825 0		
总和	440.70	28			

注：** 表示差异极显著（$P<0.01$），* 表示差异显著（$0.01\leqslant P\leqslant 0.05$）。

4.3.2 响应面分析

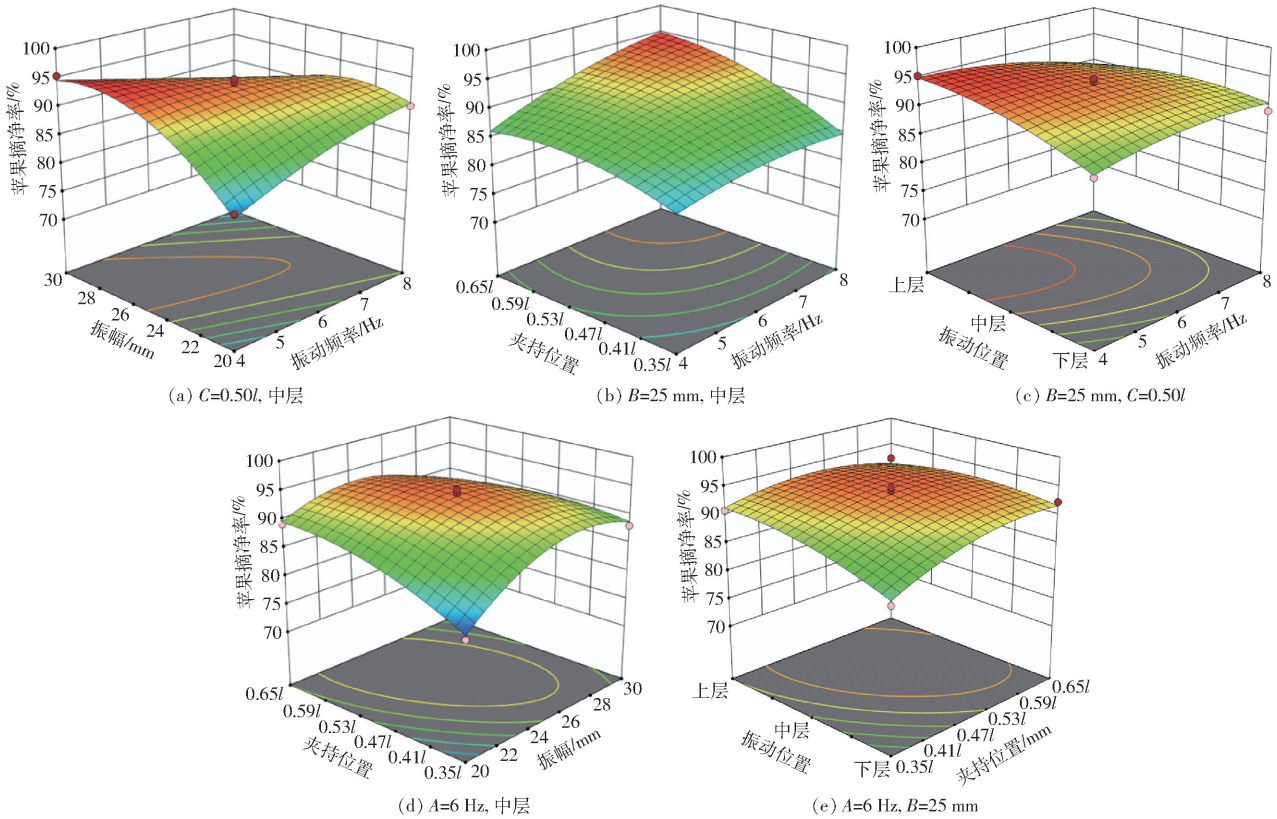
为直观反映出振动频率、振幅、夹持位置、振动位置与苹果摘净率的关系和相互作用，使用 Design-Expert 12.0 软件绘制各因素相互作用响应曲面，如图 11 所示。

由图 11a 可知，振动频率一定时，随着振幅的增大，苹果摘净率呈先上升后下降的趋势；振幅一定时，随着振动频率的增大，苹果摘净率呈先上升后缓慢下降的趋势，振动频率为 4 Hz，振幅为 30 mm，夹持位置为 0.50l，振动位置在中层时，苹果摘净率最大，为 95.3%，由于振幅的增大，使得苹果自身产生的惯性力随着苹果运动加速度的增大而增大，导致苹果沿果柄方向上的法向惯性力增大，促使苹果更易与果枝分离，从而苹果摘净率增大。由图 11b 可知，振动频率一定时，随着夹持位置的增大，苹果摘净率呈先上升后缓慢下降的趋势；夹持位置一定时，苹果摘净率随着振动频率的增大而增大。由图 11c 可知，振动频率一定时，随着振动位置的增大，苹果摘净率呈先上升后下降的趋势；振动位置一定时，苹果摘净率随着振动频率的增大而减小，振动频率为 4 Hz，振幅为 25 mm，夹持位置为 0.50l，振动位置为上层时，苹果摘净率最大，为 95.2%，由于振动位置的增大，使得二级树枝长度及直径随着振动位置的增大而减小，导致振动装置传递给树枝的能量在传递过程中损失减小，树枝传递给苹果的能量增大，进而苹果运动加速度增大，促使苹果摘净率增大。由图 11d 可知，振幅和夹持位置的交互作用对苹果摘净率的影响显著，振幅一定时，随着夹持位置的增大，苹果摘净率呈先上升后下降的趋势；夹持位置一定时，随着振幅的增大，苹果摘净率呈先上升后下降的趋势。由图 11e 可知，夹持位置一定时，苹果摘净率随着振动位置的增大呈现出先上升后下降的趋势；振动位置一定时，随着夹持位置的增大，苹果摘净率呈先上升后下降的趋势，振动频率为 6 Hz，振幅为 25 mm，夹持位置为 0.35l，振动位置为下层时，苹果摘净率最大，为 84.9%，由于减小夹持位置能够抑制二级树枝及三级树枝产生较大的位移，导致苹果运动加速度减小，进而苹果摘净率减小。

综上所述，4 种因素对苹果摘净率的影响由大到小为夹持位置、振幅、振动位置、振动频率，针对不同位置的苹果进行采摘，应当适当增加频率、振幅，根据振动位置的不同调整夹持装置的夹持位置，可有效提高苹果摘净率。

4.3.3 振动参数优化

为获得不同振动位置处苹果振动采摘的最佳参



(a) C=0.50l, 中层　(b) B=25 mm, 中层　(c) B=25 mm, C=0.50l

(d) A=6 Hz, 中层　(e) A=6 Hz, B=25 mm

图 11　各因素间交互作用对摘净率影响的响应曲面

Fig. 11　Response surfaces of interaction of various factors on removal rate

数组合，利用 Design-Expert 12.0 软件的 Optimization 模块，以上层摘净率 η_1、中层摘净率 η_0 和下层摘净率 η_{-1} 为目标函数，对振动参数组合进行优化。以各层苹果摘净率最大值为优化目标，设定各层苹果摘净率权重为 0.65[27]，设置目标函数进行求解。优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases}\max\eta(A,B,C)\\ \text{s.t.}\begin{cases}4\ \text{Hz}\leqslant A\leqslant 8\ \text{Hz}\\ 20\ \text{mm}\leqslant B\leqslant 30\ \text{mm}\\ 0.35l\leqslant C\leqslant 0.65l\\ D\in\{\text{上层},\text{中层},\text{下层}\}\end{cases}\end{cases}\tag{38}$$

最佳参数组合为：当 D 为下层时，A = 8 Hz，B = 20 mm，C = 0.65l，此组合下，苹果摘净率为 95.408%；当 D 为中层时，A = 4 Hz，B = 30 mm，C = 0.43l，此组合下，苹果摘净率为 95.358%；当 D 为上层时，A = 5 Hz，B = 28 mm，C = 0.40l，此组合下，苹果摘净率为 95.413%。

4.4　田间试验验证

为验证振动参数组合优化后结果的准确性，按优化后得到的参数调整振动试验台在田间进行振动试验，每组试验进行 20 根二级树枝的振动采摘，共进行 3 组，优化值与实际试验值之间验证结果如表 5 所示，优化值与实际值误差小于 5%，表明预测值可靠。

表 5　优化值与验证试验结果对比

Tab. 5　Comparison of optimization values and validation test results　%

参数	优化值	实际值	绝对误差
η_1	95.413	96.4	0.987
η_0	95.358	94.8	−0.558
η_{-1}	95.408	93.2	−2.208

5　结论

(1) 以苹果树二级树枝为研究对象建立苹果树二级树枝振动力学模型并求解，得到苹果树二级树枝受迫振动微分方程，通过分析苹果脱落条件，确定出振动频率、振幅、夹持位置为影响采摘效果的主要因素。

(2) 利用 ANSYS Workbench 软件分析苹果树二级树枝线性静态结构，得到二级树枝振动时最佳夹持位置范围为 0.35l ~ 0.65l；分析苹果树自由模态，得到苹果树振动采摘最佳响应频率范围为 0 ~ 15 Hz；进行苹果树二级树枝谐响应分析，得到二级树枝振动时最佳频率为 4 ~ 8 Hz，在此范围内苹果摘净率较高，果枝损伤较小。

(3) 苹果树振动采摘最佳参数组合为：当采摘果树上层位置的苹果时，振动频率为 5 Hz，振幅为 28 mm，夹持位置为 0.40l，此组合下，苹果摘净率为 95.413%；当采摘果树中层位置的苹果时，振动频率

为 4 Hz,振幅为 30 mm,夹持位置为 0.43l,此组合下,苹果摘净率为 95.358%;当采摘果树下层位置的苹果时,振动频率为 8 Hz,振幅为 20 mm,夹持位置为 0.65l,此组合下,苹果摘净率为 95.408%。通过田间验证试验,各位置摘净率优化值和实际值误差较小。

参 考 文 献

[1] 共研网. 中国苹果加工行业深度调查与市场供需预测报告[R/OL]. (2022-11-23)[2023-09-05]. https://www.sohu.com/a/608185420_121388365.

[2] BLANCO-ROLDAN G L, GIL-RIBRS 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.

[3] 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)

[4] LIU T H, LUO G, EHSANI R, et al. Simulation study on the effects of tine-shaking frequency and penetrating depth on fruit detachment for citrus canopy-shaker harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 148: 54-62.

[5] SAFDARI A, GHASSEMZADEH H R, ABDOLLAHPOUR S H A, et al. Design, construction and evaluation of a portable limb shaker for almond tree[J]. Australian Journal of Agricultural Engineering, 2010, 1(5): 179-183.

[6] HOSHYARMANESH H, DASTGERDI H R, GHODSI M, et al. Numerical and experimental vibration analysis of olive tree for optimal mechanized harvesting efficiency and productivity[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 132: 34-48.

[7] 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)

[8] 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)

[9] 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)

[10] 耿雷. 基于刚柔耦合动力学分析的蓝莓采摘机理与影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
GENG Lei. Research on blueberry picking mechanism and influencing factors based on dynamic analysis of rigid-flexible coupling[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017. (in Chinese)

[11] 陶嗣巍. 树木风振特性试验研究与有限元分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
TAO Siwei. Research on trees wind-induced vibration characteristics based on testing methods and FEM simulation[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013. (in Chinese)

[12] QIU L P, ZHU E C, VAN DE KUILEN J W G. Modeling crack propagation in wood by extended finite element method[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2014, 72(2): 273-283.

[13] 张玉星. 果树栽培学各论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.

[14] 于开平. 结构动力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.

[15] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.

[16] 散鋆龙, 刘旋峰, 牛长河, 等. 杏果实成熟度特性参数与果柄分离力的相关性分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 62-68.
SAN Yunlong, LIU Xuanfeng, NIU Changhe, et al. Relativity analysis between characteristic parameters of apricot's ripeness and its fruit removal force[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 62-68. (in Chinese)

[17] 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)

[18] ZHOU J, XU L, ZHAO J, et al. Effective excitation conditions for the intense motion of the ginkgo seed-stem system during mechanical vibration harvesting[J]. Biosystems Engineering, 2022, 215: 239-248.

[19] 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.
LIN Lepeng. The design and research of the electronic fruit for forest fruit harvesting in the vibration[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017. (in Chinese)

[20] 汪奇. 振动式油茶果采摘装置关键部件设计与分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
WANG Qi. Design and analysis of key components of vibrating *Camellia oleifera* fruit picking device[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[21] 孙桓, 陈作杰, 葛文杰. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.

[22] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京：化学工业出版社，2013.
[23] 冯晓明. 桑葚采收机的设计与分析[D]. 保定：河北农业大学，2021.
FENG Xiaoming. Design and analysis of mulberry harvester[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[24] 王冬，陈度，王书茂，等. 基于有限元方法的整形果树振动收获机理分析[J]. 农业工程学报，2017，33(增刊 1)：56 - 62.
WANG Dong, CHEN Du, WANG Shumao, et al. Analysis on vibratory harvesting mechanism for trained fruit tree based on finite element method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 56 - 62. (in Chinese)
[25] TINOCO H A, OCAMPO D A, PENA F M, et al. Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of *Coffea arabica L. var. Colombia* estimating its geometrical and mechanical properties[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 108: 17 - 27.
[26] HE L, FU H, KARKEE M, et al. Effect of fruit location on apple detachment with mechanical shaking[J]. Biosystems Engineering, 2017, 157: 63 - 71.
[27] 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)

(上接第 27 页)

[3] 姬长英，周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报，2014，45(9)：44 - 54.
JI Changying, ZHOU Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44 - 54. (in Chinese)
[4] 安秋，李志臣，姬长英，等. 基于光照无关图的农业机器人视觉导航算法[J]. 农业工程学报，2009，25(11)：208 - 212.
AN Qiu, LI Zhichen, JI Changying, et al. Agricultural robot vision navigation algorithm based on illumination invariant image[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 208 - 212. (in Chinese)
[5] YU Y, BAO Y, WANG J, et al. Crop row segmentation and detection in paddy fields based on treble-classification Otsu and double-dimensional clustering method[J]. Remote Sensing, 2021, 13(5): 901.
[6] LI Y, HONG Z, CAI D, et al. A SVM and SLIC based detection method for paddy field boundary line[J]. Sensors, 2020, 20(9): 2610.
[7] 王姗姗，余山山，张文毅，等. 基于特征点邻域 Hough 变换的水稻秧苗行检测[J]. 农业机械学报，2020，51(10)：18 - 25.
WANG Shanshan, YU Shanshan, ZHANG Wenyi, et al. Detection of rice seedling rows based on Hough transform of feature point neighborhood[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 18 - 25. (in Chinese)
[8] ZHANG T, XIA J, WU G, et al. Automatic navigation path detection method for tillage machines working on high crop stubble fields based on machine vision[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(4): 29 - 37.
[9] 李秀智，彭小彬，方会敏，等. 基于 RANSAC 算法的植保机器人导航路径检测[J]. 农业机械学报，2020，51(9)：40 - 46.
LI Xiuzhi, PENG Xiaobin, FANG Huimin, et al. Navigation path detection of plant protection robot based on RANSAC algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 40 - 46. (in Chinese)
[10] PHILIPP L, JENS B, ANDRES M, et al. Fully convolutional networks with sequential information for robust crop and weed detection in precision farming[J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2018, 3(3): 1943 - 1949.
[11] ADHIKARI S P, YANG H, KIM H. Learning semantic graphics using convolutional encoder-decoder network for autonomous weeding in paddy[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 1404.
[12] WANG Y, ZHOU Q, WU X. ESNet: an efficient symmetric network for real-time semantic segmentation[C]// 2019 Pattern Recognition and Computer Vision, Springer International Publishing, 2019: 41 - 52.
[13] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82(1): 35 - 45.
[14] 熊中刚，叶振环，贺娟，等. 基于免疫模糊 PID 的小型农业机械路径智能跟踪控制[J]. 机器人，2015，37(2)：212 - 223.
XIONG Zhonggang, YE Zhenhuan, HE Juan, et al. Small agricultural machinery path intelligent tracking control based on fuzzy immune PID[J]. Robot, 2015, 37(2): 212 - 223. (in Chinese)
[15] 李逃昌，胡静涛，高雷，等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J]. 农业机械学报，2013，44(1)：205 - 210.
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 205 - 210. (in Chinese)
[16] 郭伟斌，陈勇. 基于模糊控制的除草机器人自主导航[J]. 机器人，2010，32(2)：204 - 209.
GUO Weibin, CHEN Yong. Fuzzy control based autonomous navigation for a weeding robot[J]. Robot, 2010, 32(2): 204 - 209. (in Chinese)
[17] MATVEEV A S, HOY M, KATUPITIYA J, et al. Nonlinear sliding mode control of an unmanned agricultural tractor in the presence of sliding and control saturation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(9): 973 - 987.
[18] POLACK P, ALTCHE F, D'ANDREA-NOVEL B, et al. The kinematic bicycle model: a consistent model for planning feasible trajectories for autonomous vehicles[C]//2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2017: 812 - 818.