

手持摇枝式酸枣振动采摘装置设计与试验

刘洪杰¹ 李峻藤¹ 杨欣^{1,2} 李建平^{1,2} 王鹏飞¹

(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)

摘要: 针对酸枣收获过程中人工采收效率低、大型机械采收困难等问题, 设计了手持摇枝式酸枣振动采摘装置。通过建立酸枣“果实-枝条”单摆动力学模型, 分析受迫振动下果实脱落条件, 求解动力学模型, 确定影响酸枣采摘效果的主要因素为振动频率、振幅、夹持位置; 利用 ANSYS 仿真软件对酸枣植株模型进行自由模态响应与谐响应分析, 结果表明: 当振动频率为 4 ~ 12 Hz、振幅为 10 ~ 20 mm、夹持位置为 0.3 ~ 0.7 时, 主枝、挂果枝位移明显且对树体损伤较小。为确定采摘装置最佳工作参数, 以酸枣摘净率为评价指标, 进行三因素三水平振动采摘试验, 得到酸枣摘净率和各影响因素的数学回归模型, 利用 Design-Expert 软件对试验数据和响应曲面进行分析优化, 确定最佳工作参数组合为: 振动频率 5.91 Hz、振幅 15.30 mm、夹持位置 0.45, 此时酸枣摘净率为 93.33%, 验证试验表明, 酸枣摘净率为 94.18%, 与优化值接近, 模型优化可靠。

关键词: 酸枣; 振动采摘; 手持摇枝式; 参数优化

中图分类号: S224.93 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)09-0194-11

OSID: 

Design and Experiment of Hand-held Shaking Branch Type Jujube Vibration Picker

LIU Hongjie¹ LI Junteng¹ YANG Xin^{1,2} LI Jianping^{1,2} WANG Pengfei¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China

2. Technology Innovation Center of Intelligent Agricultural Equipment, Hebei Provincial, Baoding 071001, China)

Abstract: The hand-held shaking branch jujube harvester was designed to solve the problems of low manual harvesting efficiency and difficulty of large-scale mechanical harvesting in the process of jujube harvesting. By establishing the “fruit – branch” single pendulum dynamic model of jujube, the conditions of fruit shedding under forced vibration were analyzed, the dynamic model was solved, the main influencing factors affecting the picking effect of jujube were determined as vibration frequency, amplitude and clamping position. The free modal response and harmonic response analysis of the jujube plant model were carried out by ANSYS simulation software. The results showed that when the vibration frequency was 4 ~ 12 Hz, the amplitude was 10 ~ 20 mm, and the clamping position was 0.3 ~ 0.7, the displacement of the main branch and the hanging fruit branch was obvious and there was less damage to the tree. In order to determine the optimal working parameters of the picking device, the three-factor and three-level vibration picking test was carried out with the picking rate of jujube as the evaluation index. Mathematical regression model of picking jujube and the influencing factors were obtained. The experimental data and response surface were analyzed and optimized by Design-Expert software. The optimal working parameters were determined as follows: the vibration frequency was 5.91 Hz, the amplitude was 15.30 mm, the clamping position was 0.45. At this time, the picking rate of jujube was 93.33%. It can be seen through the validation test that the picking rate of jujube was 94.18%, which was similar to the optimized values, indicating that the optimized model was reliable.

Key words: jujube; vibration picking; hand-held shaking branch; parameter optimization

收稿日期: 2024-04-14 修回日期: 2024-04-27

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建设专项 (CARS-27) 和河北省现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (HBCT2024150202)

作者简介: 刘洪杰 (1973—), 男, 副教授, 主要从事果园智能装备研究, E-mail: liuhj@hebau.edu.cn

0 引言

酸枣又名棘,鼠李科枣属野生灌木或小乔木,广泛分布于中国北方^[1]。酸枣富含维生素 C 和矿物质,酸枣仁具有镇静安神和缓解失眠等功效,有较高的食用和药用价值^[2]。然而,由于酸枣独特的生长特性,酸枣托叶刺发达,生长环境恶劣,酸枣果实的采收目前仍以人工为主,采摘耗时耗力,效率低,严重制约酸枣的产业发展和资源利用。因此,研究酸枣采收机理并设计适合酸枣采收的装置,对提高酸枣采收效率至关重要。

机械化振动采收是林果采收的主要手段。目前国内针对酸枣振动采收机理及采摘装置的研究较少,由于其独特的生长特性,可借鉴小型林果振动采收的相关研究。国内外针对不同振动采摘装置工作参数对小型林果采摘的影响研究广泛^[3-4]。CASTRO-GARCIA 等^[5]利用模态分析受迫振动下果树的振动参数,结果表明树体在受迫振动过程中类似阻尼振荡期;TINOCO 等^[6]建立果实-果柄系统模型并进行模态分析,得到不同成熟期果实的固有频率;伍德林等^[7]通过建立油茶“果实-枝条”双摆动力学模型确定了系统固有频率;LANG^[8-9]通过建立单自由度樱桃树模型,分析了樱桃树在受迫振动下的响应状态,结果表明樱桃振动采摘与水平和垂直平面位移有关;HOSHYARMANESH 等^[10]建立了橄榄树有限元模型并进行仿真分析,确定了橄榄采摘装置的最佳工作参数组合。上述针对振动采收的研究对象多为樱桃、油茶果等,在酸枣树固有特性、酸枣果实脱落分析等方面鲜有研究报道。

国内小型林果振动采摘设备多为中大型机具,作业空间要求高且价格昂贵,不适合酸枣果实的收获。小型化人工辅助采摘装置为解决上述难题提供了新思路。闫锋欣等^[11]研制的手持冲击梳刷式油茶果采摘装置,通过冲击指的碰撞和指间梳刷作用实现油茶果采摘;于英杰等^[12]设计了一种手持振动梳刷式小粒咖啡采摘装置,采用偏心块带动梳齿振拍果实;张文强等^[13]设计了一种振摇枸杞采收机,利用偏心轴带动振摇指排产生晃动实现采收。由于酸枣树与其他果树振动特性、果柄结合力、果实坚硬程度等不同,现有装置较难满足成熟期酸枣的有效采摘。

为此,本文设计手持摇枝式酸枣振动采摘装置,通过建立酸枣“果实-枝条”单摆动力学模型,分析得到受迫振动下果实脱落条件。通过 ANSYS 有限元仿真软件对酸枣植株模型进行自由模态响应与谐响应分析,确定采摘装置振动频率、振幅、夹持位置

三因素设计方案,利用 Design-Expert 软件对试验数据和响应曲面进行分析优化,确定采摘装置最佳工作参数组合,以期为酸枣机械化采摘提供理论依据。

1 结构设计与工作原理

1.1 装置整体结构与工作原理

手持摇枝式酸枣振动采摘装置由钩子型采摘头、偏心轴、复位弹簧、连接杆、调速系统、电机、锂电池组等组成,整体结构如图 1 所示。钩子型采摘头安装在偏心轴内,复位弹簧分别与连接杆和偏心轴套接。通过减速齿轮副将电机的竖直旋转运动转换为水平旋转运动,利用偏心轴将水平旋转运动转化为偏心回转运动,产生振动使果实掉落。采摘装置的振动频率可通过调速系统控制电机的转速来进行调节,调控后装置将以调节转速恒速运转。采摘头采用钩子型卡口结构,作业时只需将枝条置于钩子型采摘头内部,接通电源,调节实时转速即可进行酸枣果实的振动采摘。

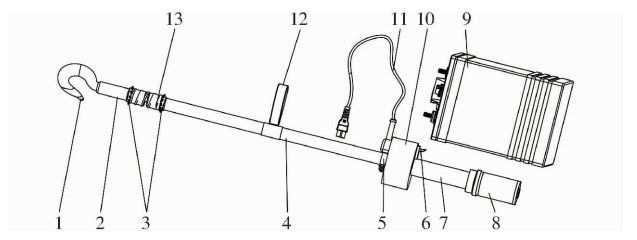


图 1 手持摇枝式酸枣振动采摘装置结构示意图
Fig.1 Hand-held shaking branch type jujube vibration picker

1. 钩子型采摘头 2. 偏心轴 3. 弹簧夹具 4. 连接杆 5. 喉箍
6. 调速旋钮 7. 手柄 8. 电机 9. 锂电池组 10. 调速系统
11. 电源线 12. 握把 13. 复位弹簧

手持摇枝式酸枣振动采摘装置使用换向器将竖直旋转运动转换为水平旋转运动,通过偏心轴将水平旋转运动转换为偏心回转运动。作业时接通电源,旋转调速旋钮实时调节所需的振动频率,通过钩子型采摘头将输出的偏心回转力传递至酸枣树枝条,使枝条在激振力的作用下产生受迫运动。当振动频率达到一定值时,采摘装置作用在酸枣树上的激励产生的惯性力大于酸枣果实与枝条的结合力,果实从枝条上脱落,完成采摘作业。

1.2 激振装置设计

偏心块是激振装置主要组成部分,为得到较大的偏心激振力,装置采用半圆柱型偏心块结构^[12]。振动过程中激振装置的自身弹性力和阻尼力远小于其工作时产生的激振力和惯性力,因此在偏心块设计时将装置产生的激振力近似等于酸枣果柄结合力,从而确定偏心块尺寸^[14]。同时为后续结合有限元分析确定装置最佳振动参数,进行酸枣果柄结合

力的测定。在酸枣成熟期内,随机选取 50 个酸枣果实样本,利用 SF-20 型数显式推拉力计测量果柄结合力;利用 CPA-225D 型电子天平测量果实质量。根据果实脱落条件分析^[15],酸枣果实脱落加速度可简化为果柄结合力与果实质量比值,计算结果如表 1 所示。

表 1 酸枣果实测量数据
Tab.1 Test data of jujube fruit

参数	最小值	最大值	平均值	标准差
果实质量/g	1.91	2.83	2.35	0.23
约束力/N	1.32	4.17	2.21	0.11
脱落加速度/(m·s ⁻²)	691.10	1 473.50	940.43	33.09

为满足采摘条件,偏心块大圆半径 R_1 取 30 mm,小圆半径 R_2 取 10 mm,内孔半径 R_3 取 5 mm,厚度 h_0 取 45 mm,如图 2 所示。根据半圆柱式偏心块计算理论^[16],材料选择 45 号钢,计算得到偏心块理论质量为 0.53 kg,偏心距为 11.62 mm。

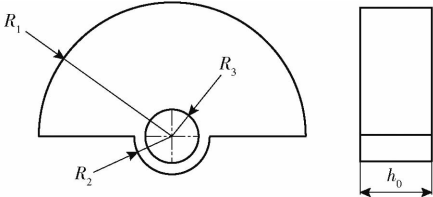


图 2 偏心块结构示意图

Fig.2 Schematic of eccentric block structure

1.3 采摘头材料选取

手持摇枝式酸枣振动采摘装置在作业过程中采摘头与酸枣果实和枝条直接接触,其结构与材料直接影响酸枣果实的采摘效果。为保证采摘装置作用于酸枣枝条时,装置不易脱落,选择钩子型卡口结构进行设计,并分别选取 ABS、铝和不锈钢 3 种材料的采摘头进行预试验,固定一致的振动参数,更换 3 种材料的采摘头分别对长势相近的酸枣枝条进行采摘,每组试验重复 3 次,统计其摘净率及枝条损伤情况。结果表明:3 种材料摘净率相近,ABS 材料对枝条的损伤低于不锈钢和铝,因此本文选取 ABS 作为采摘头材料。

1.4 相关器件选型与设计

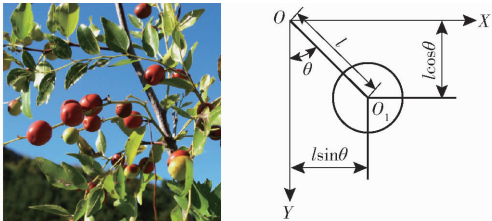
为保证采摘装置正常作业,对电机、调速系统等相关器件进行选型与设计。采摘装置选择 57BLF70-245 型无刷直流电机,额定功率 65 W,最大转速 3 000 r/min;调速系统采用 PWM 直流电机调速器,通过控制电机实时转速改变装置输出的振动频率;动力源采用 TCH 锂电池组,具有高能量密度、低自放电率、寿命长等优点,其输出电压为 24 V,电池容量 12 000 mA·h,质量 2 kg,工作时间 8 h。

2 酸枣受迫振动脱落影响因素

根据不同林果模型进行理论分析^[17-19],结合酸枣树实际生长状况建立酸枣“果实-枝条”单摆动力学模型并求解,通过对果实的受力分析得到影响果实脱落的因素。

2.1 “果实-枝条”单摆动力学模型建立

酸枣果树属于落叶灌木或小乔木,自然状态下由于重力作用挂果枝沿果柄方向自然下垂,果实生长方向随机,如图 3a 所示,受迫振动时随枝条运动。在动力学研究中,果实与果柄连接处由于弯曲产生的粘性阻尼可以忽略不计,果实成熟后果柄中含水率降低且果柄相对质量较小,故果柄质量可忽略不计^[20],可将酸枣果实视为无柄果实。将其简化为酸枣“果实-枝条”单摆动力学模型。



(a) 酸枣果实生长状态 (b) 简化模型
图 3 酸枣“果实-枝条”单摆动力学模型

Fig.3 “Fruit-branch” pendulum dynamic model of jujube

以酸枣果实悬挂点 O 为坐标原点, X 为枝条水平运动方向, Y 为枝条竖直运动方向建立坐标系 XOY ,将酸枣果实等效为质心为 O_1 的实心球体,振动时间为 t ,建立酸枣“果实-枝条”单摆动力学模型,如图 3b 所示。根据图 3b 单摆动力学模型,得到果实质心坐标为

$$\begin{cases} x = l\sin\theta \\ y = l\cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中 (x,y) ——果实质心坐标,mm
 l ——果实质心到悬挂点的距离,mm
 θ ——果实质心到悬挂点的连线与竖直方向夹角,(°)

果实在激励状态下产生摆动,其模型动能 T 为

$$T = \frac{1}{2}ml^2\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}m(\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2) + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 + ml\dot{\theta}(\dot{x}_0\cos\theta + \dot{y}_0\sin\theta) \quad (2)$$

式中 $\dot{x}_0$ ——果实水平方向分速度,m/s
 $\dot{y}_0$ ——果实竖直方向分速度,m/s
 $\dot{\theta}$ ——果实相对枝条扭转角速度,rad/s
 m ——果实质量,kg
 I ——果实转动惯量,kg·m²
以悬挂点 O_1 作为零势能点,其模型势能为

$$U = \frac{1}{2}k\theta^2 - mgl\cos\theta \tag{3}$$

式中 U ——果实势能, J

k ——等效弹性系数, 取 0.93 m/s

g ——重力加速度, 取 9.8 m/s²

联立式(2)、(3)得到拉格朗日函数为

$$L = T - U = \frac{1}{2}ml^2\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}m(\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2) + ml\dot{\theta}(\dot{x}_0\cos\theta + \dot{y}_0\sin\theta) + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 - \frac{1}{2}k\theta^2 + mgl\cos\theta \tag{4}$$

式中 L ——果实在激励状态下的拉格朗日函数

果实在振动过程中不受外界作用力, 根据已有的数学计算式, 得到拉格朗日方程^[21]为

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \tag{5}$$

联立式(4)、(5)可得酸枣“果实-枝条”单摆动力学模型系统在振动过程中的动力学微分方程为

$$(ml^2 + I)\ddot{\theta} + mgl\sin\theta + k\theta - ml\dot{\theta}(\dot{y}_0\cos\theta - \dot{x}_0\sin\theta) + ml(\ddot{x}_0\cos\theta + \ddot{y}_0\sin\theta) + ml(\dot{y}_0\cos\theta - \dot{x}_0\sin\theta) = 0 \tag{6}$$

式中 $\ddot{\theta}$ ——果实相对枝条扭转角加速度, rad/s²

该动力学模型以单个酸枣果实系统为研究对象, 为简化模型, 忽略周围果实、枝条等产生的碰撞、摩擦等不确定因素。果实在受迫振动过程中为微幅振动, 则式(6)中参数根据洛必达法则取 $\sin\theta \approx \theta, \cos\theta \approx 1$ 。本研究中不考虑果实转动惯量, 整理得

$$ml^2\ddot{\theta} + ml(\ddot{x}_0 + \dot{y}_0\theta) + k\theta + mgl\theta = 0 \tag{7}$$

2.2 “果实-枝条”单摆动力学模型求解

在酸枣单摆动力学模型中, 当采摘装置向挂果侧枝传递振动惯性力时, 果实悬挂点处枝条的运动规律与采摘装置振动规律一致^[22]。由于作用力垂直于酸枣挂果侧枝方向, 侧枝自然下垂, 可近似认为在 Y 方向上振幅为 0, 振动过程中能量的传递会受到枝条自身因素及形态结构的影响, 导致同一枝条不同位置能量的差异, 因此在求解时设 k_1 为振动频率传动比, k_2 为振幅传动比, 将装置转速转换为角速度代替频率进行求解。则枝条运动规律可表示为

$$\begin{cases} x_0(t) = k_1A_0\sin(k_2\varphi_0t) = A\sin(\varphi t) \\ y_0(t) = 0 \end{cases} \tag{8}$$

式中 A_0 ——激振位置处振幅, mm

A ——枝条振幅, mm

φ_0 ——激振位置处振动频率对应角速度, rad/s

φ ——枝条和果柄联结处振动频率对应角速度, rad/s

将式(8)代入式(7)整理可得

$$\ddot{\theta} + \frac{(mgl + k)\theta}{ml^2} = \frac{Aml\varphi^2\sin(\varphi t)}{ml^2} \tag{9}$$

对式(9)进行求解可得到通解为

$$\theta = b_1\sin\sqrt{\frac{mgl + k}{ml^2}}t + b_2\cos\sqrt{\frac{mgl + k}{ml^2}}t - \frac{Aml\sin(\varphi t)}{\frac{ml^2(mgl + k)}{ml^2} - \varphi^2} \tag{10}$$

式中 b_1, b_2 ——常数

假设

$$\omega = \sqrt{\frac{mgl + k}{ml^2}} \tag{11}$$

式中 ω ——果实自振频率对应角速度, rad/s

当初始条件 $t = 0$ 时, 则有

$$\begin{cases} \theta = 0 \\ \dot{\theta} = 0 \\ b_1 = -\frac{Aml\varphi^3}{(mgl + k)(\omega^2 - \varphi^2)\omega} \\ b_2 = 0 \end{cases} \tag{12}$$

将式(11)、(12)代入式(10)可得

$$\theta = \frac{A\varphi^2\left(\sin(\varphi t) - \frac{\varphi}{\omega}\sin(\omega t)\right)}{l(\omega^2 - \varphi^2)} \tag{13}$$

由于酸枣振动频率较小^[23], 酸枣果实在分离时的自振频率相对于受迫振动频率可以忽略不计, 因此本研究中不考虑果实自振频率 ω , 得到

$$\theta = -\frac{A}{l}\varphi\cos(\varphi t) \tag{14}$$

2.3 酸枣果实脱落影响因素分析

在激振力作用下, 酸枣植株吸收振动所产生的能量并传递到果实, 酸枣果实相对悬挂点产生受迫运动, 在运动过程中受到自身重力 G 、果柄结合力 N 、惯性力 F 共同作用。惯性力 F 可分解为法向惯性力 F_n 和切向惯性力 F_t , 法向惯性力使果实受到轴向拉力, 切向惯性力使果实在果柄与枝条连接处产生力矩, 使果柄在悬挂点处产生变形, 酸枣果实动力学分析如图 4 所示。

同理酸枣果实受迫振动所产生的加速度 a , 可分解为法向加速度 a_n 和切向加速度 a_t , 即

$$\begin{cases} F_n = ma_n = ml\dot{\theta}^2 \\ F_t = ma_t = ml\ddot{\theta} \end{cases} \tag{15}$$

将式(14)对 t 求导可得

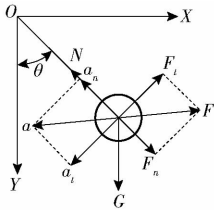


图 4 果实动力学分析
Fig.4 Fruit kinetic analysis

$$\dot{\theta} = \frac{A\varphi^2}{l}\sin(\varphi t)$$
(16)

将式(16)代入式(15)可得

$$F_n = \frac{mA^2\varphi^4}{l}\sin^2(\varphi t)$$
(17)

实际振动采收过程中,果实与挂果枝条的分离主要依靠法向惯性力 F_n ,因此振动采收过程中果实的分离力需要满足果实的法向惯性力 F_n 大于果柄结合力 N ,即满足

$$F_n + G_n > N$$
(18)

式中 G_n ——果实重力沿果柄方向的分力, N

忽略 G_n 的影响,将式(17)代入式(18)可得

$$\frac{mA^2\varphi^4}{l}\sin^2(\varphi t) > N$$
(19)

不考虑酸枣其他因素影响,式(19)中振动频率 φ 、振幅 A 为果实脱落的主要影响因素,且在采摘装置夹持位置一定时,振动频率 φ 和振幅 A 与酸枣果实的振动采收效果呈正相关。但机械振动采收过程中,若振动频率或振幅过大,会对果树造成较大损伤。因此实际振动采摘过程中,在保证果实采收效率的前提下,为降低果树损伤程度,需要确定影响果实脱落的最优组合参数。根据鲍玉冬等^[24]对采摘试验指标分析,定义枝条损伤率为机械采摘作业后被标记的损伤枝条数量占标记枝条总数量的百分比。

将枝条振动模型简化为悬臂梁模型,如图 5 所示。

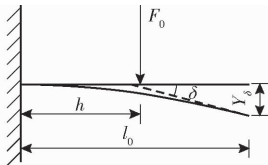


图 5 悬臂梁模型
Fig.5 Cantilever beam model

挠度曲线方程为

$$Y_\delta = \frac{F_0 h^2 (3l_0 - h)}{6EJ}$$
(20)

端截面转角为

$$\delta = \frac{F_0 h^2}{2EJ}$$
(21)

式中 Y_δ ——挠度,mm
 F_0 ——激振力,N
 l_0 ——枝条长度,mm
 h ——激振位置,mm
 E ——枝条弹性模量,MPa
 J ——枝条弯曲截面惯性矩,mm⁴
 δ ——端截面转角,(°)

综合式(20)、(21)可得激振装置的夹持位置也是影响酸枣果实脱落的重要影响因素。

3 酸枣植株有限元建模与仿真

为了给后续酸枣植株有限元分析提供准确模型,于 2023 年 10 月 3 日在河北省易县酸枣家园农业基地实地测量了收获期酸枣树的形态参数,并选取枝条样本进行物理特性试验。

3.1 酸枣植株形态参数确定

在前期调研中发现,酸枣植株达到结果树龄时,其一般有 3 级枝条。因此在本研究中,植株可被分为 3 级枝条,即主干、主枝、挂果枝,各级枝条可被简化为直径可变的圆柱体。根据枣树规范树形与不同树龄时期的整形修剪^[25],自然开心形枣树主干高度 60~100 cm、树体高度 2~3 m、无中心主枝,具有树姿开张、管理方便、通风透光好等特点。本文选取 5 棵长势相近的自然开心形枣树进行形态参数测量,采用 DL-90058 型钢卷尺测量各级枝条长度;采用 CL-711630 型游标卡尺测量各级枝条始端直径与末端直径,计算平均值,统计结果如表 2 所示。

表 2 酸枣植株形态参数
Tab.2 Shape parameters of jujube plants

枝条级别	枝条长度/mm	枝条始端直径/mm	枝条末端直径/mm	在上级枝条数量/个
主干	946	34.3	25.5	
主枝	1 360	27.5	10.5	6
挂果枝	155	6.5	3.5	10

3.2 酸枣植株物理参数测定

选取 5 棵长势相近的自然开心形酸枣树,采用 DL-2778 型树枝剪进行枝条取样,每棵枣树取样数目为 4 根,取样枝条长度为 8 cm,保鲜袋密封保存。采用 HZY-1000 型电子秤测量枝条质量,应用水浸法进行枝条体积的测量,计算得到酸枣各级枝条平均密度,结果如表 3 所示。

采用 HY-0560 型电子万能试验机、HY-500 型微机控制扭转试验机和 CL-711630 型游标卡尺分别测量得到酸枣各级枝条压力增量、扭矩增量、枝条长度变化量、枝条横截面积以及枝条惯性矩,泊松

表 3 酸枣植株各级枝条参数

Tab.3 Parameters of jujube branches

枝条级别	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	剪切模量/ MPa	泊松比
主干	0.931 5	1 520	540	0.40
主枝	1.013 9	1 210	440	0.38
挂果枝	1.148 9	850	310	0.38

比可由弹性模量与剪切模量计算得出^[26],测定原理为

$$\begin{cases} E = \frac{\Delta F l_1}{\Delta l A_0} \\ G_0 = \frac{\Delta T l_2}{\Delta \phi I_p} \\ \mu = \frac{E}{2G_0} - 1 \end{cases} \quad (22)$$

- 式中
- G_0 ——剪切模量,MPa
- μ ——泊松比
- ΔF ——压力增量,N
- ΔT ——扭矩增量, $\text{N}\cdot\text{m}$
- Δl ——枝条长度变形量,mm
- $\Delta \phi$ ——枝条长度变化量,mm
- l_1 、 l_2 ——枝条长度,mm
- A_0 ——枝条横截面积, mm^2
- I_p ——枝条惯性矩, mm^4

将测量得到的试验数据代入式(22),计算平均值,得到酸枣各级枝条弹性模量、剪切模量及泊松比,如表 3 所示。

3.3 酸枣植株有限元模型构建及仿真分析

根据实际测量枣树具体尺寸,简化酸枣树体模型,忽略除枝条以外的质量影响。使用 Solidworks 2023 软件建立酸枣植株主干、主枝及挂果枝的三维模型,将各级枝条模型简化为欧拉-伯努利弹性梁模型,且将枝条的截面等效简化为圆形,如图 6a 所示。

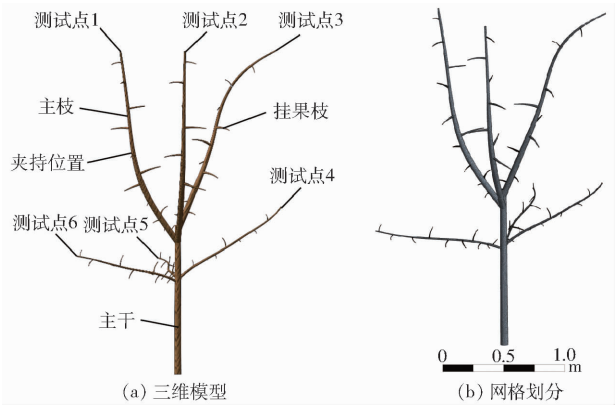


图 6 酸枣植株有限元模型

Fig.6 Finite element models of jujube plants

使用 ANSYS 软件对酸枣树进行有限元分析,根

据上述密度、弹性模量、泊松比等试验数据,定义酸枣植株各级枝条参数。分别对酸枣主干、主枝、挂果枝进行树体分割,忽略外力干扰,阻尼设置为 0,网格采用四面体方法进行中等精度划分,划分结果如图 6b 所示。根据植株实际生长情况,主干根部施加固定约束,树冠部分为自由端。

高频振动容易造成能量传递衰减,能量利用率低下,更易对果树树体造成损伤,且一般振动装置的激振频率在 30 Hz 以内^[27],故本研究只截取小于 30 Hz 的固有频率,利用 Modal 模块计算得到酸枣树模型自由状态下前 35 阶固有频率,固有频率范围为 1.19 ~ 29.61 Hz。图 7 为 6 个具有代表性的自由模态响应云图。

分析酸枣植株自由模态响应云图可知,前 7 阶自由模态中酸枣植株部分枝条末端有较为明显的变形响应性,但整体上位移量较小;第 11 阶和第 20 阶自由模态中酸枣枝条末端响应性较高,枝条位移明显;第 30 阶酸枣植株整体响应性较高,枝条末端形变最大;当自由模态为 32 阶,频率达到 27.917 Hz 时,酸枣植株部分枝条变形严重,此时振动频率过大易折断枝条,损伤果树。

为确定酸枣树枝条在正弦位移作用下的稳定响应,在模态分析基础上采用 Harmonic Response 模块对酸枣树进行谐响应分析。忽略树体根部和土壤对酸枣树模型的影响,主干根部施加固定约束,在距离主干-主枝分叉点 80 cm 处加载 100 N 的简谐力,方向垂直于枝条轴向,如图 6a 所示。由上述仿真结果设定频率范围为 0 ~ 30 Hz,采用完全法求解,求解方案间隔为 30 个。选取果树枝条末端 6 个标记点作为测试点,分别测量统计各个测试点的振动加速度,得到各个测试点的加速度变化曲线,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,当振动频率接近酸枣树固有频率时,即达到 4、12、19、28 Hz,各测试点在 X、Y、Z 3 个方向均取得较大加速度,其中在振动频率为 4 Hz 和 12 Hz 时达到典型加速度峰值,此时振动采收效果较好。考虑加速度过大易对酸枣树体造成损伤,结合上述自由模态分析仿真结果,本试验中酸枣振动采摘装置的最佳激振频率范围可设为 4 ~ 12 Hz,振动频率水平为 4、8、12 Hz。

为确定酸枣植株在固定幅值作用下的稳定响应,于相同激振点位置施加振幅进行谐响应分析。激振点设定振幅范围为 0 ~ 30 mm(间隔 5 mm),结合上述仿真结果设定频率范围为 0 ~ 30 Hz,采用完全法求解,求解方案间隔为 15 个,处理后得到不同振幅激励下各个测试点的加速度-频率变化曲线,图 9 为 3 个具有代表性的加速度变化曲线。

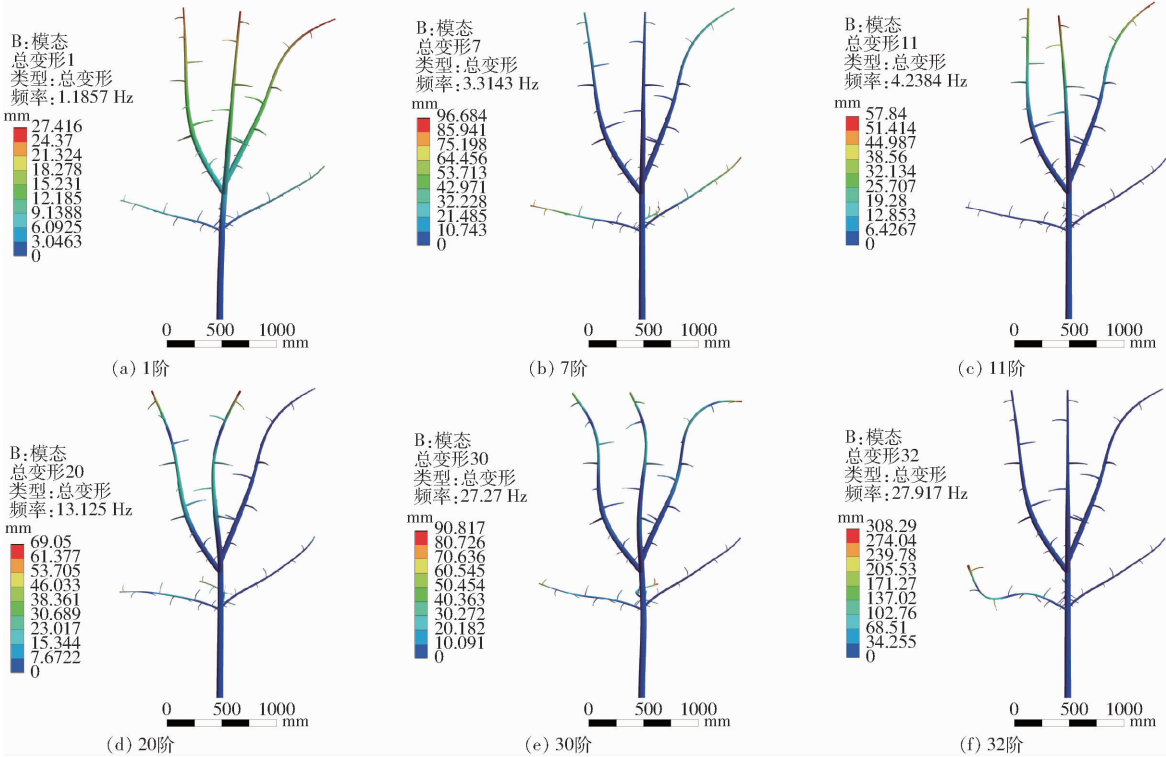


图 7 酸枣植株自由模态响应云图

Fig. 7 Jujube plants free modal response cloud maps

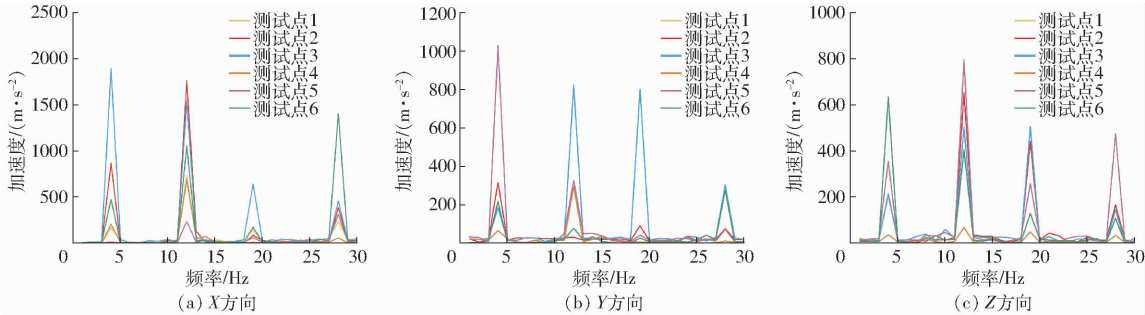


图 8 简谐力作用下测试点加速度变化曲线

Fig. 8 Acceleration curves of test point under simple harmonic force

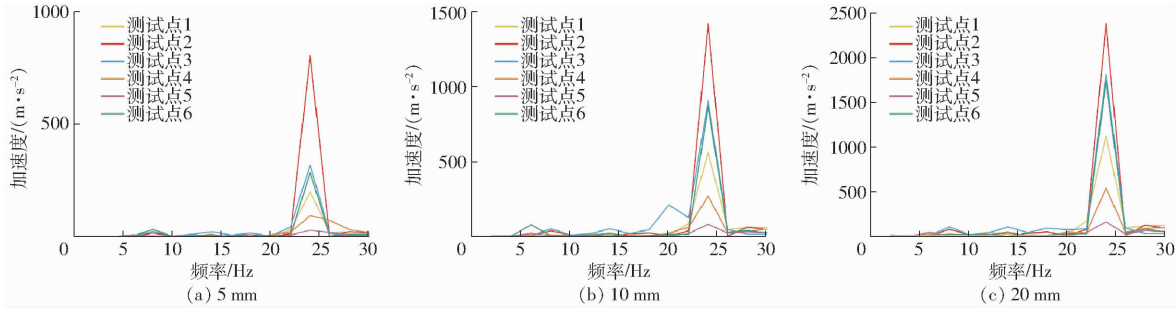


图 9 不同振幅激励下测试点 X 轴方向加速度变化曲线

Fig. 9 X-axis acceleration curves of test point under different amplitude excitation

根据谐响应仿真结果,各测试点在固定振幅作用下均在 12 Hz 时达到典型加速度峰值,且在同一频率下,随着激励振幅增大,加速度峰值也增大。结合酸枣果柄结合力测定分析,为确保摘净率大于 90%,以脱落加速度的 90% 分位数 ($1\,326.14\text{ m/s}^2$) 为衡量酸枣果实脱落的标准^[15]。由图 9 可知,当激励

振幅为 5 mm 时测试点加速度峰值为 806.35 m/s^2 ,低于目标脱落加速度,不满足脱落条件;当激励振幅超过 10 mm 时,测试点加速度峰值均高于目标脱落加速度,其中激励振幅为 10 mm 时加速度峰值为 $1\,483.62\text{ m/s}^2$,激励振幅为 20 mm 时加速度峰值为 $2\,376.91\text{ m/s}^2$,满足果实脱落条件。考虑振幅过大

易对酸枣树体造成损伤、降低能量传递效率,本试验中酸枣振动采摘装置的最佳振幅范围设置为 10 ~ 20 mm,振幅水平为 10、15、20 mm。

夹持位置以激振点距离主干-主枝分叉处的长

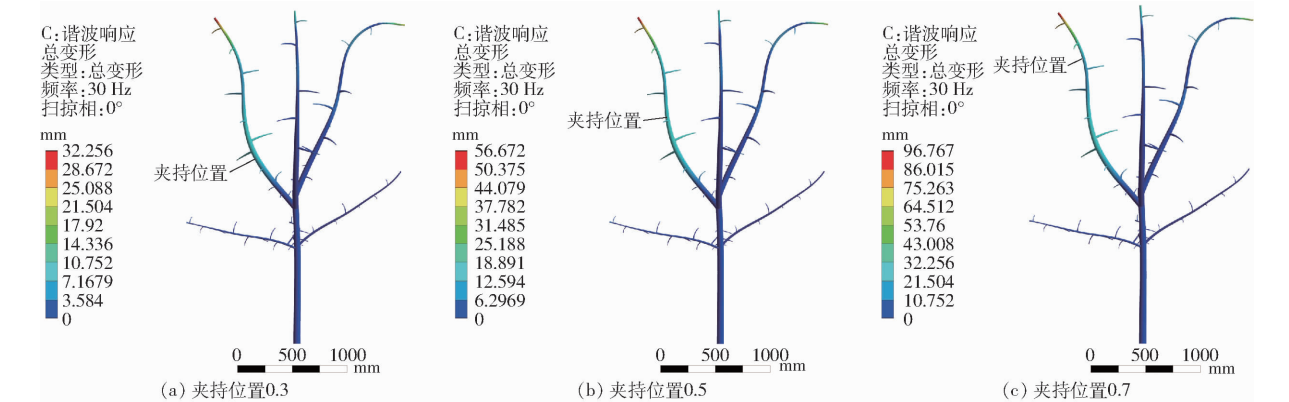


图 10 酸枣植株变形云图

Fig. 10 Deformation cloud diagrams of jujube plants

由图 10 可知,随着夹持位置的增大整个酸枣植株模型的振幅也逐渐增大。当夹持位置为 0.3 时,酸枣植株整体枝条位移量较小,主枝末端最大振幅较小。当夹持位置为 0.5、0.7 时,酸枣植株模型振幅明显增大,主枝及挂果枝整体位移量明显。且夹持位置越接近于主枝末梢,酸枣植株模型整体变形越大,但过大的变形易折断枝条、损伤果树。因此,夹持位置应接近于主枝中部,在保证酸枣摘净率的同时能够降低树体损伤,本试验中夹持位置范围设置为 0.3 ~ 0.7,夹持位置水平为 0.3、0.5、0.7。

4 采摘试验

4.1 试验条件与设计

为获得手持摇枝式酸枣采摘装置的最佳振动参数组合,根据酸枣“果实-枝条”单摆动力学模型及有限元分析结果,于 2023 年 10 月初在河北省保定市易县酸枣家园农业基地中进行振动采摘试验。选择不同振动频率、振幅和采摘头的夹持位置进行采摘作业,分别统计作业前后挂果枝条上的酸枣果实数量,采摘试验现场如图 11 所示。



图 11 采摘试验现场

Fig. 11 Harvesting trial site

酸枣摘净率是指采摘作业时脱落的酸枣数量占

度与主枝总长度的比值来表示,利用 ANSYS 软件分别在主枝夹持位置 0.1 ~ 0.9 范围内施加 100 N 的简谐力,间隔为 0.1,求解得到酸枣植株总变形云图,图 10 为 3 个具有代表性的变形云图。

挂果枝条上总酸枣数量的比例,总酸枣数量等于采摘作业时酸枣脱落数量和未脱落数量之和。根据实际生产中不同农产品的加工需求,主要利用酸枣果实中酸枣仁的药用价值,因此本试验中将酸枣摘净率作为主要评价指标,摘净率计算公式为

$$P = \frac{N_1}{N_1 + N_2} \times 100\%$$
 (23)

式中 P ——果实摘净率,%
 N_1 ——酸枣脱落数量,个
 N_2 ——酸枣未脱落数量,个

以振动频率 A 、振幅 B 、夹持位置 C 为因素,酸枣摘净率 P 为响应值,确定试验因素编码,如表 4 所示。利用 Design-Expert 13.0 软件中 Box - Behnken 模块进行三因素三水平的试验分析,试验次数为 $2K(K - 1) + M_0$,其中 K 为自变量总数,取 $K = 3$; M_0 为中心点试验数,取 $M_0 = 5$,共设计 17 组试验^[28]。试验过程中,每组试验进行 3 次,取 3 次试验平均值作为该组试验结果,试验结果如表 5 所示^[29-30]。

表 4 试验因素编码
Tab. 4 Experimental factors and coding

编码	因素		
	振动频率 A/Hz	振幅 B/mm	夹持位置 C
-1	4	10	0.3
0	8	15	0.5
1	12	20	0.7

4.2 试验结果与分析

利用 Design-Expert 13.0 软件对表 5 中的数据进行多元二次回归拟合,处理后得到振动采摘时酸枣摘净率 P 的方差分析结果,如表 6 所示。

表 5 试验结果
Tab.5 Test results

试验序号	因素			<i>P</i> /%
	<i>A</i> /Hz	<i>B</i> /mm	<i>C</i>	
1	12	10	0.5	86.1
2	8	15	0.5	93.1
3	8	15	0.5	92.8
4	4	20	0.5	90.1
5	8	10	0.7	88.5
6	12	20	0.5	88.9
7	4	15	0.3	91.7
8	8	20	0.3	90.5
9	4	15	0.7	90.1
10	8	15	0.5	92.5
11	8	10	0.3	87.7
12	4	10	0.5	90.7
13	8	15	0.5	92.7
14	8	15	0.5	91.9
15	8	20	0.7	87.8
16	12	15	0.7	88.1
17	12	15	0.3	88.2

表 6 酸枣摘净率方差分析

Tab.6 Analysis of variance of jujube picking net rate					
来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>p</i>
模型	72.97	9	8.11	69.42	<0.000 1 **
<i>A</i>	15.96	1	15.96	136.67	<0.000 1 **
<i>B</i>	2.31	1	2.31	19.79	0.003 **
<i>C</i>	1.62	1	1.62	13.87	0.007 4 **
<i>AB</i>	2.89	1	2.89	24.75	0.001 6 **
<i>AC</i>	0.562 5	1	0.562 5	4.82	0.064 2
<i>BC</i>	3.06	1	3.06	26.22	0.001 4 **
<i>A</i> ²	7.96	1	7.96	68.16	<0.000 1 **
<i>B</i> ²	21.79	1	21.79	186.6	<0.000 1 **
<i>C</i> ²	12.17	1	12.17	104.19	<0.000 1 **
残差	0.817 5	7	0.116 8		
失拟项	0.017 5	3	0.005 8	0.029 2	0.992 3
纯误差	0.800 0	4	0.200 0		
总和	73.78	16			

注：**表示影响极显著(*p*<0.01)。

根据酸枣摘净率 *P* 的方差分析结果可知,该模型显著性检验 *p*<0.000 1,说明以酸枣摘净率 *P* 作为响应函数的回归模型具有高度显著性,失拟项 *p*=0.992 3 不显著,说明该模型较为稳定,回归方程拟合程度高。振动频率 *A*、振幅 *B*、夹持位置 *C* 以及 *A*²、*B*²、*C*²、*AB*、*BC* 对酸枣摘净率影响极显著。剔除不显著项 *AC* 建立酸枣摘净率 *P* 与酸枣振动采摘过程中振动频率 *A*、振幅 *B*、夹持位置 *C* 之间的二次多项式回归模型为

$$P=63.287+0.197A+2.848B+32.900C+0.043AB-0.700BC-0.084A^2-0.086B^2-27.200C^2 \quad (24)$$

4.3 贡献率分析

贡献率能够直观反映各个因素对所构建二次多项式回归模型的影响程度。贡献率越大,其影响程度越大。贡献率 Δ_j 计算公式为

$$\Delta_j=\lambda_j+\frac{1}{2}\sum_{\substack{i=1\\i\neq j}}^n(\lambda_{ij}+\lambda_{ji}) \quad (j=1,2,3) \quad (25)$$

式中 λ_j ——第 *j* 个因素一次项贡献率
 λ_{jj} ——第 *j* 个因素二次项贡献率
 λ_{ij} ——第 *j* 个因素与其他因素交互作用贡献率

参考值 λ 表达式为

$$\lambda=\begin{cases} 0 & (F\leq 1) \\ 1-\frac{1}{F} & (F>1) \end{cases} \quad (26)$$

根据上述方差分析的 *F* 值,通过式(25)、(26)计算酸枣振动采摘过程中各个振动参数对酸枣摘净率贡献率如表 7 所示。

表 7 各因素对评价指标贡献率

Tab.7 Contribution rates of various factors to evaluation indicators	
因素	贡献率
振动频率 <i>A</i>	2.85
振幅 <i>B</i>	2.90
夹持位置 <i>C</i>	2.79

由表 7 可知,酸枣振动采摘过程中各个振动参数对酸枣摘净率均有显著影响,各个振动参数对酸枣摘净率的贡献率从大到小为:振幅 *B*、振动频率 *A*、夹持位置 *C*。

4.4 响应曲面分析

为了更直观分析振动频率、振幅、夹持位置 3 个因素对评价指标的影响,分别固定 1 个因素处于零水平,研究其余两个试验因素之间交互作用响应。根据上述二次多项式回归模型,利用 Origin 软件绘制采摘过程中振幅与振动频率、夹持位置与振动频率、夹持位置与振幅两两之间交互对酸枣摘净率的响应曲面,如图 12 所示。

当夹持位置为 0.5 时,振幅与振动频率的交互作用对酸枣摘净率的影响如图 12a 所示。当振幅一定时,随着振动频率的增大,酸枣摘净率呈缓慢上升后逐渐下降的趋势。在任一振动频率条件下,酸枣摘净率随着振幅的增大呈先上升后缓慢下降的趋势,并且随着振动频率增大,酸枣摘净率的上升趋势逐渐变缓。振动频率为 8 Hz、振幅为 15 mm、夹持位置为 0.5 时,酸枣摘净率最大,为 93.1%。当振幅为 15 mm 时,夹持位置与振动频率的交互作用对酸枣摘净率的影响如图 12b 所示。当夹持位置一定

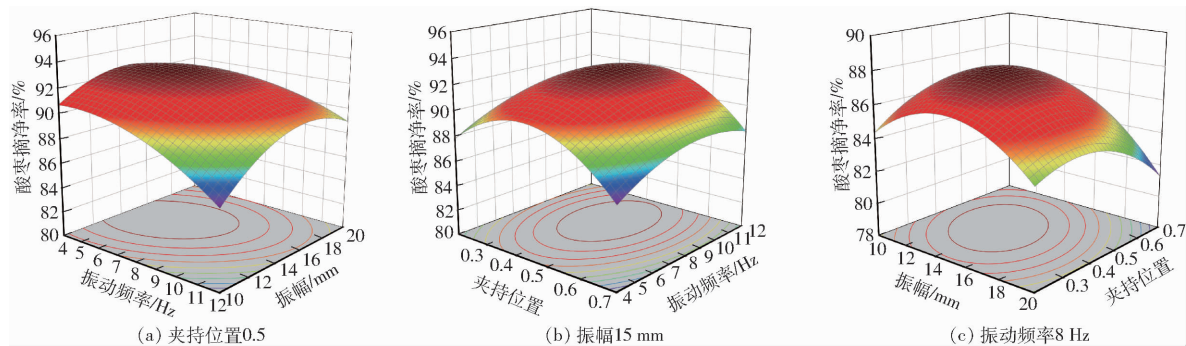


图 12 试验因素对摘净率影响的响应曲面

Fig. 12 Effect of experiment factors on recovery rate

时,随着振动频率增加酸枣的摘净率也不断增加,呈现先上升后逐渐下降的趋势;当振动频率一定时,酸枣摘净率随着夹持位置的增大呈先上升后下降的趋势,由于较低的夹持位置会影响主枝及挂果枝的振动位移效果,较高的夹持位置容易对酸枣树体造成损伤,因此激振装置的夹持位置接近主枝的中间部位时有利于酸枣摘净率的提高。当振动频率为 8 Hz 时,夹持位置与振幅的交互作用对酸枣摘净率的影响如图 12c 所示。当夹持位置一定时,酸枣摘净率随着振幅的增大呈先上升后缓慢下降的趋势;当振幅一定时,酸枣摘净率随着夹持位置的增大呈缓慢上升后逐渐下降的趋势。

4.5 振动参数优化

根据上述试验结果分析,在酸枣振动采摘过程中不同的振动参数对酸枣摘净率具有较大影响,为获得手持摇枝式酸枣振动采摘装置的最优工作参数,并要求装置具有高摘净率,利用 Design-Expert 软件中 Optimization 模块,对建立的 3 个因素的二次回归模型进行优化求解,性能指标目标函数为

$$\begin{cases} \max P(A, B, C) \\ \text{s. t. } \begin{cases} 4 \text{ Hz} \leq A \leq 12 \text{ Hz} \\ 10 \text{ mm} \leq B \leq 20 \text{ mm} \\ 0.3 \leq C \leq 0.7 \end{cases} \end{cases} \quad (27)$$

对目标函数优化求解得到手持摇枝式酸枣振动采摘装置最优工作参数组合为:振动频率 5.91 Hz、振幅 15.30 mm、夹持位置 0.45,此时酸枣摘净率为 93.33%。为验证优化后回归模型的可靠性,按优化

后得到的振动参数进行振动试验,试验重复 3 次,取平均值作为试验结果。结果表明,采用以上振动参数进行采摘试验时酸枣摘净率为 94.18%,优化值与实际值误差小于 5%,优化值可靠。

5 结论

(1)利用拉格朗日函数,建立酸枣“果实-枝条”单摆动力学模型并求解,得到酸枣果实受迫振动微分方程,通过分析酸枣果实脱落条件,确定出振动频率、振幅、夹持位置作为影响酸枣采摘效果的主要因素。

(2)运用 ANSYS 软件对酸枣植株三维模型进行有限元分析,通过酸枣植株自由模态响应分析和谐响应分析确定振动频率最佳取值范围为 4 ~ 12 Hz;通过施加不同激励振幅的谐振动响应分析确定振幅最佳取值范围为 10 ~ 20 mm;通过不同夹持位置施加简谐力的分析确定夹持位置的最佳取值范围为 0.3 ~ 0.7。

(3)以振动频率、振幅和夹持位置作为试验因素,建立以酸枣摘净率为评价指标的多元二次回归模型及响应曲面分析;通过贡献率分析计算得到酸枣振动采摘过程中各振动参数对酸枣摘净率的影响由大到小为:振幅、振动频率、夹持位置。

(4)利用 Design-Expert 软件响应优化模块对试验结果进行优化,得到手持摇枝式酸枣振动采摘装置的最佳参数组合为:振动频率 5.91 Hz、振幅 15.30 mm、夹持位置 0.45,此时酸枣摘净率为 93.33%。田间验证试验表明,酸枣摘净率为 94.18%,误差小于 5%,模型优化可靠。

参 考 文 献

[1] 李树军,陈廷珠,杨建军,等. 山西省酸枣蜜源植物分布特点及利用价值调查研究[J]. 中国蜂业, 2014(8): 34 - 35.
[2] 王永法,李东帅,李贵山. 野生酸枣开发利用技术及效益研究[J]. 河南林业科技, 2001,21(4): 52 - 53.
[3] 散肇龙,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)
[4] 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)
- [5] CASTRO-GARCIA S, BLANCO-ROLDAN L G, GIL-RIBES J A, et al. Dynamic analysis of olive trees in intensive orchards under forced vibration[J]. Trees, 2008, 22: 795–802.
- [6] 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.
- [7] 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)
- [8] LANG Z. Dynamic modelling structure of a fruit tree for inertial shaker system design[J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(1): 35–44.
- [9] LANG Z. A one degree of freedom damped fruit tree model[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(3): 823–829.
- [10] 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.
- [11] 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 Xujie, 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. (in Chinese)
- [12] 于英杰, 王剑, 赖庆辉, 等. 手持振动梳刷式小粒咖啡采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 124–133.
YU Yingjie, WANG Jian, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of hand-held vibrating comb-type *Coffea arabica* L. harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 124–133. (in Chinese)
- [13] 张文强, 张明明, 张俊雄, 等. 振摇枸杞采收机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 97–102.
ZHANG Wenqiang, ZHANG Mingming, ZHANG Junxiong, et al. Design and experiment of vibrating wolfberry harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 97–102. (in Chinese)
- [14] 李成鹏, 尚书旗, 王东伟, 等. 振动式高酸苹果采摘机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2024, 46(4): 106–113.
LI Chengpeng, SHANG Shuqi, WANG Dongwei, et al. Design and test of vibratory high acid apple picker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(4): 106–113. (in Chinese)
- [15] 张军, 张絮, 牧昊天, 等. 单偏心式油橄榄振动采收机仿真优化与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 114–123.
ZHANG Jun, ZHANG Xu, MU Haotian, et al. Simulation optimization and test of single eccentric olive vibrating harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 114–123. (in Chinese)
- [16] 张合军, 王军玮. 几种常用偏心块偏心矩及其激振力的计算分析[J]. 矿山机械, 1999(6): 68.
ZHANG Hejun, WANG Junwei. Calculation and analysis of eccentric moments and excitation forces of several commonly used eccentric blocks[J]. Mining Machinery, 1999(6): 68. (in Chinese)
- [17] CHAITANYA P, JOSEPH P, NARAYANAN S, et al. Performance and mechanism of sinusoidal leading edge serrations for the reduction of turbulence-aerofoil interaction noise[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 818: 435–464.
- [18] SANJOSE M, MOREAU S. Direct noise prediction and control of an installed large low-speed radial fan[J]. European Journal of Mechanics/B Fluids, 2017, 61(P2): 235–243.
- [19] 高艺, 徐成宇, 曹国华. 小型风力机翼羽仿生耦合桨叶结构研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 193–197.
GAO Yi, XU Chengyu, CAO Guohua. Investigation of bionic coupling blades structure for small wind turbine wing feathers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 193–197. (in Chinese)
- [20] BLANCO-ROLDAN 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.
- [21] 陈希有, 郭源博, 齐琛, 等. 论拉格朗日方程与基尔霍夫定律相互演绎[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 2036–2045.
CHEN Xiyu, GUO Yuanbo, QI Chen, et al. On the mutual deduction of Lagrange's equation and Kirchhoff's law [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 2036–2045. (in Chinese)
- [22] 王立军, 段良坤, 郑招辉, 等. 三移动两转动振动筛驱动机构优化与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 138–145.
WANG Lijun, DUAN Liangkun, ZHENG Zhaohui, et al. Optimization and experiment on driving mechanism of vibrating screen with three translations and two rotations [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 138–145. (in Chinese)
- [23] 王立军, 宋慧强, 彭博. 两移动两转动振动筛驱动机构设计与分析[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(6): 88–96.
WANG Lijun, SONG Huiqiang, PENG Bo. Design and analysis of driving mechanism of 2T–2R vibrating screen[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(6): 88–96. (in Chinese)
- [24] 鲍玉冬, 李志鹏, 郭艳玲, 等. 振动式蓝莓采摘机对果实收获的影响试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(1): 96–100.
BAO Yudong, LI Zhipeng, GUO Yanling, et al. Effects of vibrating based picking machine on blueberry fruit harvest[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2014, 40(1): 96–100. (in Chinese)

the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 116 – 127, 194. (in Chinese)

[16] 印祥, 安家豪, 王显, 等. 高地隙施药机喷杆自动调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 98 – 105, 115.
YIN Xiang, AN Jiahao, WANG Xian, et al. Design and test of automatic beam leveling system for high-clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 98 – 105, 115. (in Chinese)

[17] 周志艳, 周铭杰, 陈羽立, 等. 喷杆喷雾机旋翼悬浮式喷杆自动调平控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 70 – 79.
ZHOU Zhiyan, ZHOU Mingjie, CHEN Yuli, et al. Automatic leveling control system of rotors hovering spray boom sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 70 – 79. (in Chinese)

[18] 周志艳, 向颖, 陈羽立, 等. 喷杆喷雾机旋翼悬浮式喷杆自动收放控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 120 – 131.
ZHOU Zhiyan, XIANG Ying, CHEN Yuli, et al. Automatic retraction control system of rotors hovering spray boom sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 120 – 131. (in Chinese)

[19] 王晓燕, 邓博, 谭丁炀, 等. 无驱动式自动调平水田埋杆起浆整地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 20 – 31.
WANG Xiaoyan, DENG Bo, TAN Dingyang, et al. Design and experiment of undriven soil puddling machine with improved auto-leveling and straw-burying design for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 20 – 31. (in Chinese)

[20] 王军, 唐清, 穆森林, 等. 设计并测试了清洁筛网为谷物联合收割机[J]. Agriculture, 2023, 13(2): 377.

[21] 王艳, 刘艳. 钻机平台单通道液压调平支腿的控制分析[J]. 机床与液压, 2016, 44(22): 80 – 83, 89.
WANG Yan, LIU Yan. Control analysis of a drilling rig platform's single channel hydraulic leveling leg[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(22): 80 – 83, 89. (in Chinese)

[22] 柯超, 谢守勇, 邓成志, 等. 丘陵山地移栽机自动调平系统设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(8): 17 – 26.
KE Chao, XIE Shouyong, DENG Chengzhi, et al. Design and test of automatic leveling system for transplanter in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(8): 17 – 26. (in Chinese)

[23] 吴先坤. 履带自走式采茶机的设计与试验研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
WU Xiankun. Design and experimental study on self-propelled tea-picking machine [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[24] 金诚谦, 杨腾祥, 刘岗微, 等. 履带式联合收获机全向调平底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 393 – 402.
JIN Chengqian, YANG Tengxiang, LIU Gangwei, et al. Design and test of posture controlled chassis for caterpillar combine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 393 – 402. (in Chinese)

(上接第 204 页)

[25] 马保建. 矮化休眠期枣树智能剪枝关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
MA Baojian. Study on the key technologies of intelligent pruning for dwarf and dormant jujube tree[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)

[26] 彭俊. 冬枣振动收获机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
PENG Jun. Mechanism study on vibration harvesting of *Ziziphus jujuba* Mill. cv. Dongzao [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)

[27] 翁凌云. 林果采收振动系统动态特性传递研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
WENG Lingyun. Research on dynamic properties transmitted of forest-fruit vibratory harvester system[J]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013. (in Chinese)

[28] 季学文. 基于 Box – Behnken 设计法的生态复合固化土的性能研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2021.
JI Xuewen. Research on properties of ecological composite solidified soil based on Box – Behnken design method[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)

[29] 曹卫彬, 杨双平, 李树峰, 等. 梳夹式红花采收机等高位装置参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 48 – 56.
CAO Weibin, YANG Shuangping, LI Shufeng, et al. Parameter optimization of height limiting device for comb-type safflower harvesting machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(14): 48 – 56. (in Chinese)

[30] 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)