

不同激振方式下枸杞振动采摘仿真与试验

陈清宇，张是夏，卫乃硕，凡云雷，张 薇，王泽宇，陈 军^{*}，陈 雨

(西北农林科技大学机械与电子工程学院，杨凌 712100)

摘 要：为实现枸杞摘熟留青，高效采收，根据枸杞无限花序特点和果-花-叶脱落加速度分布顺序，该研究提出一种无需直接接触果实的振动采摘方法，依靠果实惯性力完成熟果采摘。根据所述采摘方法提出上下同振、上静下振和上下反振的激振方式并设计相应的采摘机，得到振动头的运动学模型，同时建立枸杞枝条和枝-柄-果的仿真模型。通过有限元瞬态动力学分析与 ADAMS 动力学仿真方法，得到不同激振方式下枝条的振动响应，以及果实激振下的振动响应，以此分析果实脱落机理。仿真结果表明，不同的激振方式会影响枝条的振动响应。为获得适宜枸杞采摘的激振方式和最佳振动参数，采用三因素三水平二次正交旋转组合试验，建立了以熟果采摘率、未熟果误采率、熟果损伤率为试验指标，以振动幅度、激振方式、振动频率为试验因素的数学模型，分析各因素对各指标的影响，获得最佳参数组合：振动幅度 31.13 mm、激振方式上静下振、振动频率 12.59 Hz。田间试验熟果采摘率为 95.14%，未熟果误采率为 4.61%，熟果损伤率为 2.98%。研究结果可为后续机械化采收设备的设计和试验提供参考。

关键词：枸杞；振动采摘；激振方式；脱落机理；仿真；响应面法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202408110

中图分类号: S23-01

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-03-0032-11

陈清宇，张是夏，卫乃硕，等. 不同激振方式下枸杞振动采摘仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(3): 32-42. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202408110 <http://www.tcsae.org>

CHEN Qingyu, ZHANG Shixia, WEI Naishuo, et al. Optimizing the parameters for the vibration harvesting of *Lycium barbarum* L. under various excitation modes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(3): 32-42. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202408110 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

枸杞属于茄科多年生木本植物，具有无限花序，连续花果特点，其挂果枝从根部到枝头熟果、未熟果与花朵依次连续生长，枝上分布有叶片和短刺^[1-2]。目前枸杞采收主要以人工分茬采收为主，宁夏地区每茬采摘间隔时间约为一周，枸杞成熟后需要及时采收以防滋生病害影响果实质量。采收期劳动力需求大，夏季采收受高温日晒影响工作条件恶劣，人工采收速度慢，采收成本居高不下的同时经常出现用工难，用工荒等问题，采收难题亟待解决^[3-5]。

枸杞在国外种植分布较少，因此相关研究主要集中在国内^[6-8]。根据采摘方式不同可以将现有的枸杞采摘机分为振动式、梳刷式、振刷式与气力式，就田间试验结果而言，振动式采收能够有效提高采收效率，熟果采摘率大多能达到 90% 以^[9-12]。然而现有的枸杞振动采摘机大多采用多点振动的方法，在同一根挂果枝上施加多个激励，采收过程中仍存在采摘未熟果和损伤熟果等问题，

严重时未熟果采摘率与果实损伤率大于 10%^[13-14]。振动式采摘根据激振对象不同可以大致分为激振主干和激振枝条两种类型^[15-17]，由于枸杞熟果柄长，质量轻，植株垂直根系与水平根系在土层中的主要分布范围多小于 60 cm，若采用激振主干的方式进行采摘容易导致根系受损，影响来年产量^[18-22]。因此现有研究的振动式枸杞采摘机多直接作用于挂果枝^[23-24]。

在枸杞采摘研究中，如何减少未成熟果实的采摘和成熟果实的损伤已成为研究的重点。对于不同的振动采收机，频率和振幅通常是影响振动采摘效果的关键性因素^[25-27]。同时采收频率和振幅需要根据作业目标和收获条件而变化。由于结构限制，往复式枸杞采收机的振动频率通常低于 20 Hz，采用偏心轮结构的采收机频率则能够达到更高，不同采收机的振动幅度变化较大，但通常小于 10 cm^[8-13]。除了振动频率和幅度，有研究表明振动方式也能够影响到振动采摘效果。ZHANG 等^[28]研究了 3 种振动方法（连续非线性、连续线性和间歇线性振摇）对采摘效果的影响。ZHOU 等^[29-30]研究了骏枣枝-果系统在 3 种激励模式（水平、垂直和旋转）下的振动响应，以分析和预测果实的运动过程。

在振动采摘的相关研究中，仿真具有不受环境和时间限制等优势，因此受到广泛关注和应用^[31-32]。JUN 等^[33]使用有限元方法获得了 3 种果树的振动响应，结果表明仿真在分析振动响应方面具有应用前景。NIU 等^[34]结合有限元仿真和振动测试分析了橄榄树的振动响应，证明

收稿日期: 2024-08-14 修订日期: 2024-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32272001); 宁夏回族自治区揭榜挂帅项目 (2022BBF01002)

作者简介: 陈清宇, 博士生, 研究方向为果园机械化采收装备。

Email: 2019050914@nwfufu.edu.cn

※通信作者: 陈军, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能化农业装备。Email: chenjun_jdxy@nwsuaf.edu.cn

瞬态分析能够预测树枝的振动响应。VILLIBOR 等^[35]对树枝、果柄和咖啡进行建模，将果柄离散化以提高柔韧性，从而分析咖啡果实与果柄连接处在振动过程中的能量传递。WANG 等^[36]基于 ADAMS 进行了菊花采摘机的动力学仿真，以确定影响采摘效果的主要因素。此外，徐丽明等^[3]在 ADAMS 中将枸杞的连续实心树枝离散为多个小圆柱，以实现柔性建模和仿真。这些研究表明，使用仿真手段分析采摘时枸杞枝条和果实的振动响应是可行的。

根据枸杞生长特点，本文提出无需直接接触果实的振动采摘方法。并在此基础上，设计 3 种不同激振方式的采摘机。通过瞬态动力学仿真获得枝条的振动响应，通过动力学仿真获得果实的振动响应与脱落机理。采用正交组合试验的方法，获得最优的激振方式及振动参数，探索出一种实现枸杞摘熟留青，高效采收的方法，拟为后续小型手持式和大型自走式枸杞收获设备的设计与开发提供理论基础。

1 枸杞特性与采摘方法

1.1 枸杞植株特性参数

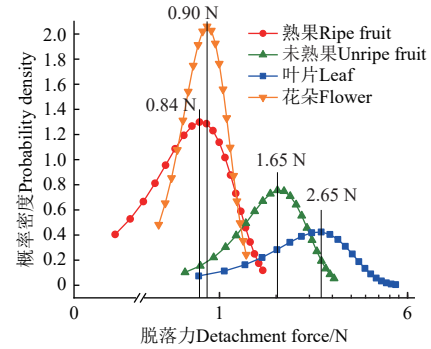
为了解枸杞农艺以及生长特性，获取相关物理参数，2022 年 7 月在宁夏回族自治区固原市宁夏正杞红实业发展有限公司（36°17'32.9"N，106°6'41.5"E）进行试验。试验品种为宁杞 7 号，树龄为 3~4 年，为方便采收，枸杞树采用标准双层篱架式栽培模式，树高 1.1~2.4 m，种植行距为 3 m，株距为 1.1 m。熟果平均果长为 26.07 mm，直径为 10.74 mm，果柄长度为 26.12 mm。相较传统粗放式枸杞栽培模式，篱架式枸杞树型高，能够有效减少枝条拖地导致的果实腐烂，枝条分层自然下垂，能够有效减少挂果枝相互缠绕，从而方便采摘，同时为枸杞采收机械设计与研发提供农艺基础。

调研选取生长状况良好，无病虫害，无明显缺陷的枸杞植株，使用数显推拉计（型号：HP-30；测量范围：0-30 N；精度：0.01 N）测量枸杞熟果、未熟果、花朵、叶片的脱落力，使用电子秤（型号：专业数字珠宝秤 8028 系列；测量范围：0~100 g；精度：0.001 g）来测量质量。共计测量 75 个成熟果实、46 个未成熟果实、43 片叶子和 25 朵花。

根据所获脱落力数据绘制脱落力分布图如图 1a 所示。可以发现，枸杞收获期间，枸杞熟果、未熟果、花朵、叶片与挂果枝之间的脱落力有一定差异，脱落力平均值由小到大依次为，熟果、花朵、未熟果和叶片，这与 ZHAO 等^[37]和李乐凯^[38]的研究基本一致。然而果、花、叶脱落力分布区间有明显重叠，在实际采摘过程中若不加以识别，采用直接施力于果叶花的采摘方式，容易在采摘熟果的同时导致未熟果、叶片等的脱落，影响采收效果的同时减少后续产量。

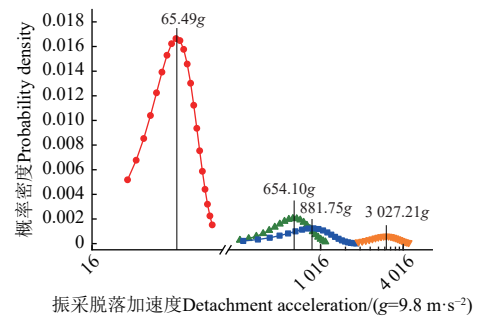
振动采摘主要依靠惯性力使熟果脱落，即当果实在振动时受到的惯性力大于等于脱落力时，果实脱落。根据惯性力公式分析可知，枸杞振动采收机械的原理是在不达到未熟果、叶片、花朵的脱落加速度的情况下，使枸杞熟果获得足够的脱落加速度，从而实现摘熟留青的

采摘效果。根据惯性力公式计算得出振动采摘时，使果-花-叶惯性力等于脱落力所需的加速度，绘制振动采摘脱落加速度分布图如图 1b 所示。振动采摘脱落加速度平均值由小到大依次为：熟果、未熟果、叶片和花朵，各分布区域相互之间重叠较小，能够较好区分，通过控制振动参数，有希望在保证熟果脱落的同时减少未熟果、叶片和花朵的误采。



a. 脱落力正态分布图

a. Normal distribution diagram of detachment forces



b. 振动采摘脱落加速度正态分布图

b. Normal distribution diagram of detachment acceleration

图 1 脱落参数分析

Fig.1 Analysis of detachment parameters

1.2 采摘方法

当激振挂果枝时，振动以能量波的形式在枝条上传递^[39-40]。为实现摘熟留青的采摘效果，根据枸杞无限花序特点和果-花-叶脱落加速度分布顺序，提出一种无需直接接触果实的振动采摘方法，其原理如图 2 所示。

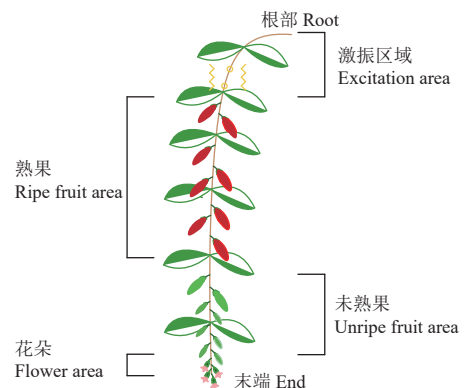


图 2 无直接接触采摘方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of picking principle

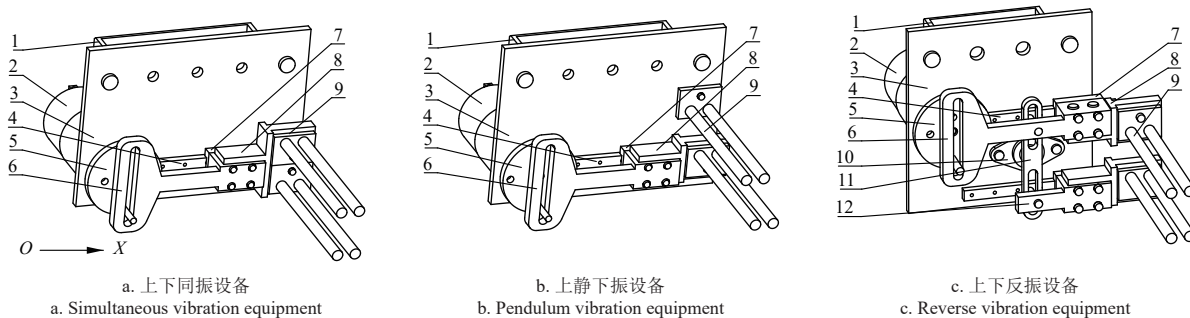
不同于传统采用曲柄连杆机构多点带动枝条与果实往复振动的采摘方法，振动采摘机仅在枸杞熟果区域上

方激振, 通过挂果枝传递振动, 从而带动枸杞果实持续往复摆动, 当枸杞熟果所受惯性力大于等于果实与果柄间的脱落力时, 熟果脱落, 完成采摘。

2 三种激振方式与设备

根据所述采摘原理, 同时为对比和选取合适的激振方式, 提出上下同振、上静下振和上下反振 3 种激振方

式并设计相应的手持式振动采摘机进行试验, 3 种设备结构类似, 如图 3 所示, 主要由把手、电机、安装板、导轨、曲柄、连杆、滑块、连接件和振动头等组成。其中, 为减轻连杆机构质量, 减少机构传动产生的惯性力, 提高振动频率, 减少操作不适感, 传动部件与振动头均采用聚乳酸材料 3D 打印制作, 且振动头间距较小, 能够对挂果枝起到夹持作用, 从而更好地传递振动。



1.把手 2.电机 3.安装板 4.导轨 5.曲柄 6.连杆 7.滑块 8.振动头 9.振动杆 10.轴承 11.传动板 12.传动连杆

1. Handle 2. Motor 3. Mounting plate 4. Slideway 5. Crank 6. Connecting link 7. Slider 8. Clamping head 9. Vibration rods 10. Bearing 11. Transmission plate 12. Transmission rod

图 3 三种激振设备示意图

Fig.3 Schematic diagram of three types of excitation equipment

如图 4 所示, 曲柄由电机驱动, 采摘机工作原理为依靠曲柄滑块机构将电机的旋转运动转变为振动头的往复运动, 为减少其他试验因素影响, 3 种采摘机均使用 2 个振动头上下布置, 夹持振动挂果枝激振区域, 实现采摘。通过振动头的不同布置, 3 种设备分别能够为挂

果枝提供上下同向往复振动 (上下同振), 上方夹持固定下方往复振动 (上静下振), 以及上下反向往复振动 (上下反振) 3 种激振方式。此外, 采摘机的振动频率可以通过调节电机转速控制, 采摘机的振幅可以通过改变曲柄上螺钉的位置控制。

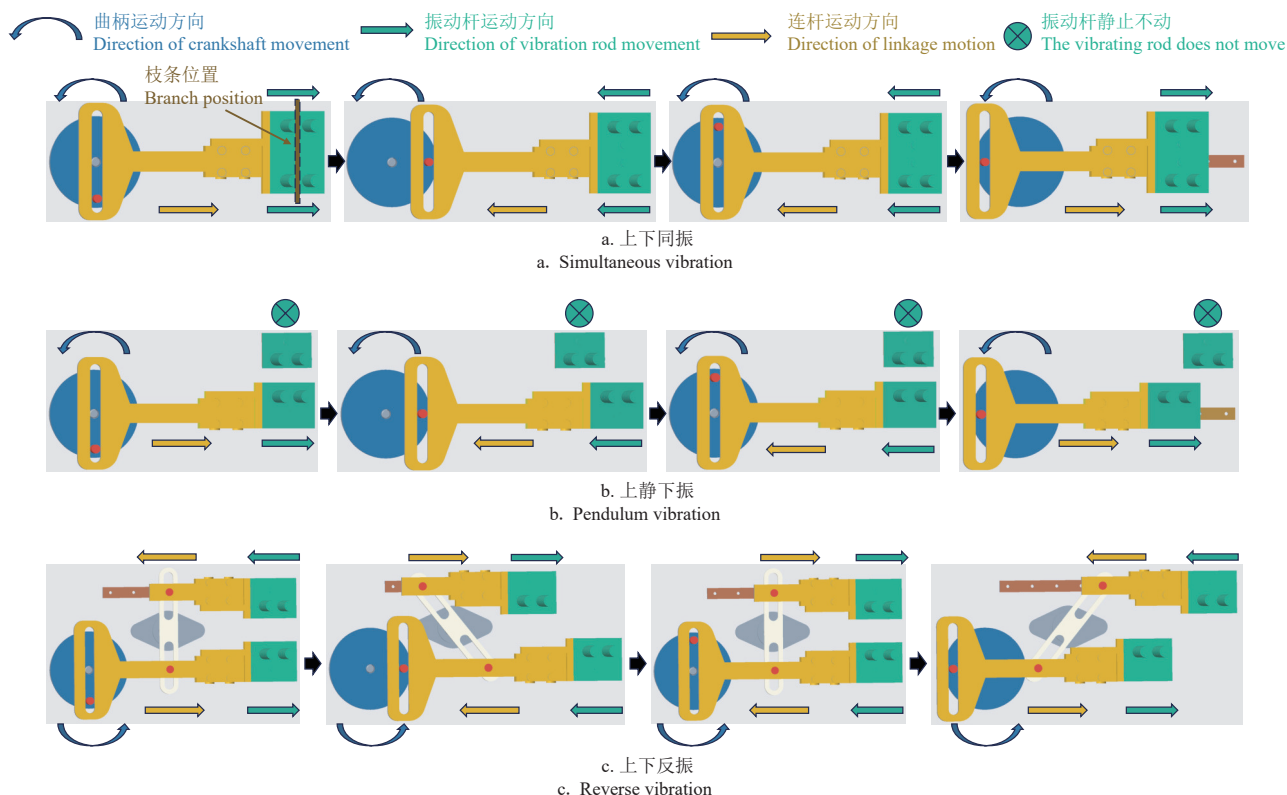


图 4 三种激振方式驱动原理

Fig.4 Driving principles of three kinds of excitation

振动采摘时, 振动头夹紧枝条驱动其往复振动, 因

此枝条被夹持位置的振动响应与振动头一致。为分析枝

条的振动响应, 对振动头进行运动学分析:

$$x = R \sin\left(\omega_c t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (1)$$

$$v = -R\omega_c \cos\left(\omega_c t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

$$a = \frac{R\omega_c^2 \sin\left(\omega_c t - \frac{\pi}{2}\right)}{9.8} \quad (3)$$

式中 x 为振动头/枝条激振位置位移, mm; v 为振动头/枝条激振位置速度, mm/s; a 为振动头/枝条激振位置加速度, mm/s²; ω_c 为直流电机转速, rad/s; R 为曲柄半径, mm。

查阅文献综述并进行预试验, 结果表明, 当振动频率为 5~15 Hz 且振动幅度为 20~40 mm 时, 能够有效采收枸杞熟果^[9,11]。根据式 (1)~(3), 计算结果显示, 激振位置的最大加速度为 (1.01~18.13) g 。为便于模拟与讨论, 选择中间值对枝条进行仿真, 振动频率为 10 Hz, 振动幅度为 30 mm, 此时, 激振位置的最大加速度达到 6.04 g 。

3 仿真方法与试验

3.1 仿真模型

由于枸杞枝条的尺寸小、质量轻, 安装加速度传感器对其振动响应有显著影响。因此, 本研究采用有限元瞬态动力学与 ADAMS 动力学仿真的方式模拟枝条与果实在采摘机作用下的振动响应, 并探讨振动采摘时果实脱落机理。如图 5 所示, 为了简化模型, 提高仿真效率并方便分析, 分别构建枝条和枝-柄-果模型。

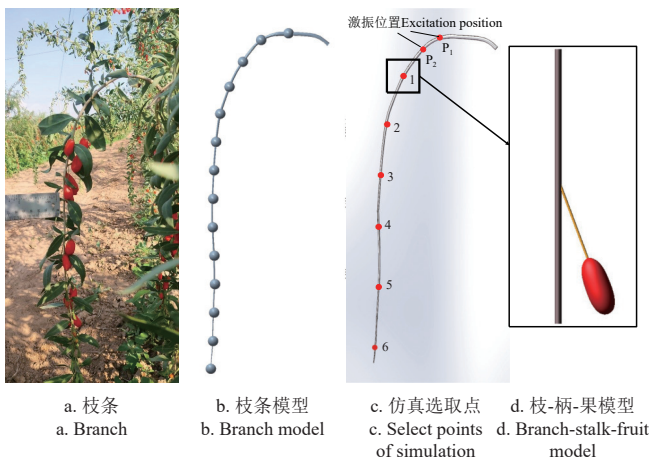


图 5 仿真模型

Fig.5 Simulation model

3.1.1 枝条仿真模型

如图 5a 所示, 在枸杞田中选取一根生长状况良好, 无病虫害, 无明显缺陷, 自然下垂的挂果枝。利用数字角度尺 (型号: DL305200; 测量范围: 0~200 mm; 精度: 1 mm 和 0.1°) 从挂果枝根部起每间隔 2 cm 分段, 并测量每段枝条与水平面的夹角, 利用游标卡尺 (型号: DL91150; 测量范围: 0~150 mm; 精度: 0.01 mm) 测量每段枝条的直径。采用 SolidWorks2020 建模, 首先用

样条曲线将测量点绘制成三维草图, 然后在每个测量点绘制垂直于三维样条曲线的圆形截面, 最后利用 SolidWorks 的放样函数, 通过圆形截面和样条曲线, 建立枝条的三维模型, 如图 5b 所示。

枸杞枝条上生长有果实、叶片、花朵的部位叫做节, 由于枝条上绝大部分质量集中于果实与叶片上, 因此为获得较为准确的挂果枝模型, 从挂果枝根部到末端对每一节上果实与叶片数量进行统计, 所选枝条上共有 40 节, 为简化模型, 将挂果枝按 4 cm 距离分段, 根据熟果、未熟果与叶片的平均质量计算每段的载荷, 将其视为集中质点建立质量集中模型, 模型如图 5b 所示。如图 5c 所示, P_1 和 P_2 是施加振动激励的位置, 在枝条模型上选取点 1~6 用于监测枝条的振动响应。

3.1.2 枝-柄-果仿真模型

仅研究枝条的振动响应不足以全面说明枸杞果实在振动采摘时的脱落机理。因此本研究构建了枸杞枝-柄-果仿真模型, 以获取振采过程中果实的振动响应, 并进一步分析果实脱落机理, 枝-柄-果仿真模型如图 5d 所示。

3.2 仿真试验

3.2.1 枝条仿真试验

瞬态动力学分析是用于确定承受任意的, 随时间变化载荷结构的动力学响应的一种方法。可以用瞬态动力学分析确定结构在稳态载荷、瞬态载荷和简谐载荷的随意组合作用下的随时间变化的位移、应变和应力。有研究使用瞬态动力学获得果树在振动过程中的响应情况^[32-33]。为获得挂果枝在振动采摘过程中的运动响应, 在 Ansys Workbench 环境下对枝条进行瞬态动力学分析, 枝条材料参数如表 1 所示^[37,41], 根据每节质量添加集中质点, 对模型划分网格, 共获得 8 199 个节点与 3 666 个单元。

表 1 仿真参数

Table 1 The simulation parameters

材料 Material	密度 Density / (kg·m ⁻³)	弹性模量 Elastic modulus / MPa	泊松比 Poisson's ratio
枝 Branch	421	585	0.30
果实 Fruit	933	0.13	0.40
果柄 Stalk	2 461	90 565	0.38

由于振动过程中采摘机夹持枝条振动, 经计算发现振动杆与枝条上下的接触点偏移不大, 因此将挂果枝在采摘过程中受到的激振简化为固定位置的简谐位移载荷, 在枝条模型根部添加固定约束。根据 3 种激振方式, 在激振位置处添加上下同振, 上静下振, 以及上下反振的简谐位移载荷。在分析设置中设置总步长为 1, 当前时间步为 1, 结束时间为 0.2 s, 子时间步为 100, 通过田间预试验得到枝条阻尼比为 0.029, 打开时间惯性选项。

3.2.2 枝条仿真试验结果

枝条仿真结果如图 6 所示, 当激振幅度与频率 (振动频率为 10 Hz, 振动幅度为 30 mm) 确定时, 振动杆的振动响应可由式 (1)~(3) 得出, 不同激振方式下振动杆的振动响应相同, 激振点 P_1 和 P_2 的振动响应也相同, 仿真结果表明:

1) 将枝条上各选取点的振动幅值和最大加速度由大到小排列: 上下反振、上静下振、上下同振。因此, 不同的激振方式对枸杞枝条的振动响应有一定影响;

2) 虽然各选取点的振动响应不相等, 但其数值均在同一数量级。靠近枝条末端的选取点振动响应明显大于其他点, 符合鞭梢效应: 振动采摘时, 枝条能量逐渐向下传递并集中, 受振结构的质量和长度的减小导致其振动响应的增加;

3) 枝条上各选取点的振动幅值和最大加速度均高于振动头。其中, 振动幅值差异较小, 而最大加速度差异较大。同时各选取点的最大加速度均小于成熟果实的平均脱落加速度, 不能使成熟果实全部脱落;

4) 当激振方式为上静下振时, 各选取点的最大加速度平均值为 29.50 g , 不满足成熟果实的振采脱落加速度, 而在预试验中观察到在该参数下大部分熟果能够脱落, 因此仅凭枝条的振动响应不能解释果实振动脱落的原因, 要想了解果实脱落机理, 还需对枝-柄-果进行进一步的仿真。

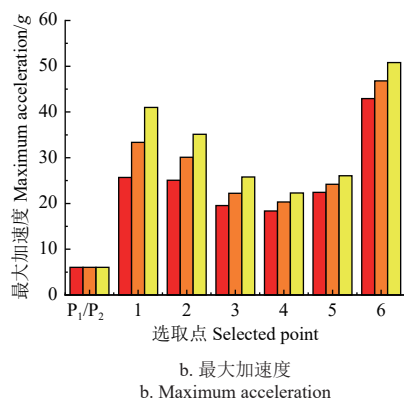
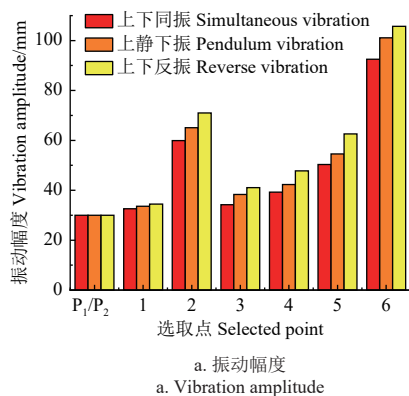


图6 选取点的振动响应

Fig.6 Vibration response of selected point

3.2.3 枝-柄-果仿真试验

通过枝条仿真能够得到枝条在不同激振方式下的振动响应, 然而枸杞挂果枝结构组成复杂, 形态多变, 具有果柄长, 果实轻等特点, 仅依靠枝条的运动难以解释果实的振动采摘过程。因此为研究果实的振动响应和脱落机理, 采用 ADAMS 动力学分析手段, 将果柄离散为 100 节连杆实现果柄柔性化, 在枝-柄和柄-枝连接处建立柔性连接, 材料参数如表 1 所示^[37, 41-42]。在仿真环境中添加标准地球重力, 为枝条增加移动副连接, 并在其上

添加平移驱动。

3.2.4 枝-柄-果仿真结果

图 7 为振动频率为 10 Hz , 振动幅值为 30 mm , 3 种激振方式下枝条所选点 1 的位移随时间变化的曲线。选取点 1 的振动响应可视为简谐运动。根据图 7 中所选点 1 的瞬态分析结果, 在 ADAMS 中对枝条施加平移的简谐运动 (振动频率 10 Hz , 振动幅度 33.58 mm)。仿真时间为 0.5 s , 步数为 $5\,000$ 步, 果实的振动响应如图 8 所示。

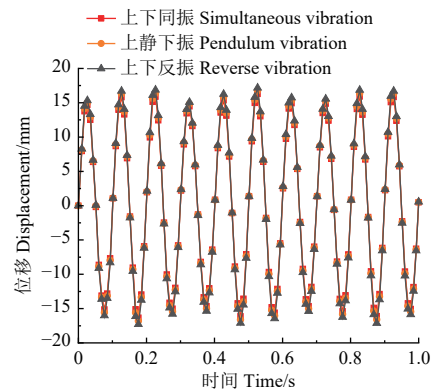


图7 选取点 1 的位移

Fig.7 The displacement of selected point 1

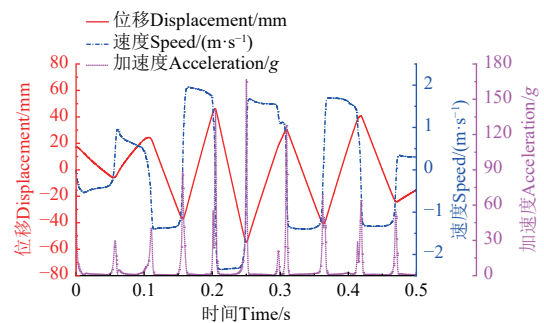


图8 果实的振动响应

Fig.8 The vibration response of fruit

选取仿真结果中果实加速度最大瞬间前后各 5 ms , 分析振动采摘过程中枸杞果实的脱落机理, 振动响应如图 9 所示。综合枝-柄-果的仿真结果发现:

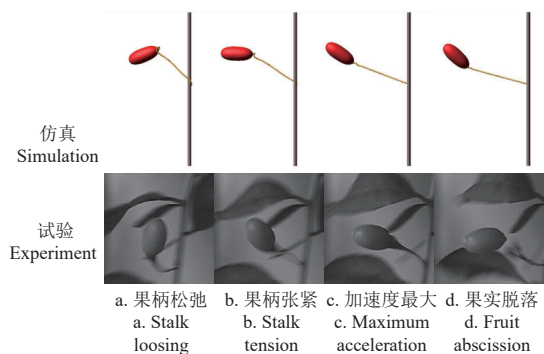


图9 果实加速度最大时的振动响应

Fig.9 The movement of fruit when the acceleration is maximum

1) 仿真中果实的加速度最大值大于枸杞熟果最大振采脱落加速度, 小于枸杞未熟果最小振采脱落加速度 (图 2), 能够实现摘熟留青的采收效果;

2) 由于果柄长而柔软, 在振动过程中, 果实受到果柄牵引, 果柄时而张紧, 时而放松, 导致果实与枝条的振动响应差异较大;

3) 在振动过程中, 振动响应从振动头 (振动幅度 30 mm, 最大加速度 6.04 g) 到枝条选取点 (振动幅度 33.58 mm, 最大加速度 29.50 g), 再到果实 (振动幅度 100.79 mm, 最大加速度 167.13 g) 逐渐变大。

4) 当果实加速度达到峰值时, 果实位置移动到一侧极限, 果柄张紧, 果实速度方向发生变化。以图 9 为例, 速度在 5 ms 内从 -1.79 m/s 变化到 1.63 m/s, 导致果实的加速度和惯性力陡然增大, 达到枸杞熟果采摘脱落加速度。

3.2.5 果实脱落受力分析

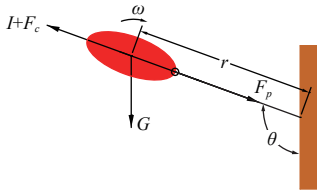
如图 10 所示, 取枝-柄-果仿真振动过程中的果实加速度最大的瞬间, 对果实受力进行分析:

$$F_p = I + F_c + G \cos \theta \quad (4)$$

$$F_c = m\omega^2 r \quad (5)$$

$$I = ma' = m \frac{v_2 - v_1}{9.8t} \quad (6)$$

式中 a' 为果实的加速度, g; v_2 为后一瞬时果实的速度, m/s; v_1 为前一瞬时果实的速度, m/s; m 为果实的质量, g; t 为时间, s。



注: F_p 为果实与果柄的结合力, N; I 为果实所受的惯性力, N; F_c 为果实所受的离心力, N; G 为果实所受重力, N; θ 为重力与惯性力方向夹角, ($^\circ$); ω 为果实绕枝条旋转的速度, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; r 为实质心距枝条的距离, m。
Note: F_p is the force at the union between the fruit and the fruit stalk, N; I is the inertial force on the fruit, N; F_c is the centrifugal force on the fruit, N; G is the gravity on the fruit, N; θ is The angle between the gravity direction and the inertia direction, ($^\circ$); ω is the speed of fruit rotation around the branch, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; r is the distance of fruit placenta from branch, m.

图 10 果实脱落受力分析

Fig.10 Force analysis of fruit shedding

根据受力分析结果, 果实在振动采收过程中受到重力、离心力和惯性力作用, 其中, 由于果实质量轻, 果柄短, 果实所受的重力和离心力占比较小, 果实主要依

靠在摆动时因速度大小与方向快速变化而产生的惯性力达到脱落条件。

3.3 验证试验

3.3.1 试验方法

在田间选取枸杞枝条, 使其尽可能与仿真模型一致。为便于试验与观察, 将枝条从根部剪下, 常温保存, 整个试验在 1 h 内完成。如图 11 所示, 使用虎钳夹住枝条根部, 使用白色作为背景, 使目标易于区分。3 种振动设备 (如图 3 所示) 按照所述振动采摘方式在果实上方对枝条进行激振, 振动频率为 10 Hz, 振幅为 30 mm, 激振持续时间为 5 s, 使用高速摄像机 (型号: I-Speed LT; 图像分辨率: 1280×1024; FPS: 500) 记录激振过程。每种激振方式试验 5 根枝条。输出视频为 HSV 格式, 通过存储卡传输到计算机, 采用与高速摄影机配套的 I-Speed Suite 软件进行分析处理。追踪处理的原理是: 为视频建立坐标轴, 追踪每一帧中所选点的坐标, 得到所选点在振动过程中的运动位置从而计算得到枝条选取点与果实的振动幅度。由于不可能使用同一枝条进行振动试验, 尝试在每根枝条上人为选择与模拟位置一致的点进行追踪。试验共计对 15 根枝条, 30 个枸杞熟果进行追踪。



图 11 验证试验

Fig.11 The validation test

3.3.2 试验结果

由于高速摄像机获取的树枝和果实的加速度信息存在一定误差且误差难以量化, 因此对瞬态分析仿真和高速摄像验证试验获得的选取点振动幅度进行比较。如图 12 所示, 可以发现模拟仿真与验证试验结果的平均值十分接近且趋势相同。

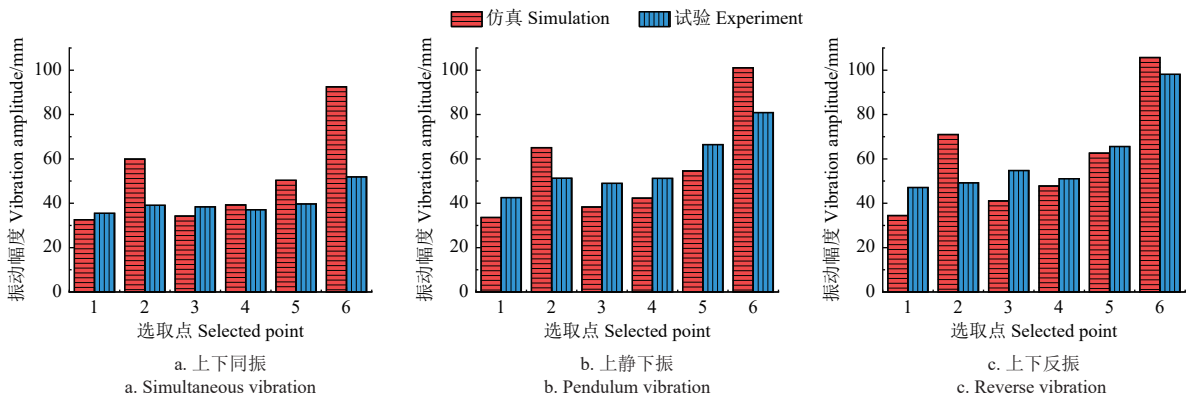


图 12 选取点的振动幅度

Fig.12 The vibration amplitude of selected point

试验结果表明, 仿真与验证试验的相对误差分别为: 上下同振 30.52%, 上静下振 21.70%, 上下反振 19.12%, 平均相对误差为 23.78%。截取高速摄像机拍到的典型果实运动结果如图 9 所示, 可以发现枝-柄-果仿真中的果实运动与验证试验结果相似。验证试验中果实的最大速度为 2.07 m/s, 仿真中果实的最大速度为 2.36 m/s, 相对误差为 14.01%。对于本研究而言, 仿真的相对误差处于合理范围之内, 使用仿真手段模拟枸杞枝-柄-果的振动响应是可行的。

4 参数优化试验

4.1 试验指标

试验地点与试验条件如前文所述。枸杞采摘机的主要设计要求是在不损伤熟果的同时, 将挂果枝上熟果尽可能全部采摘下来, 同时应尽可能避免采摘未熟果, 防止影响后续产量。本次采摘机性能试验以考察枸杞综合采摘效果为主要目的, 根据前人研究^[1,12,22], 选取熟果采摘率 I_1 、未熟果误采率 I_2 、熟果损伤率 I_3 作为本次采摘机性能试验的 3 个指标, 其计算式为

$$I_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \times 100\% \tag{7}$$

$$I_2 = \frac{n_3}{n_3 + n_4} \times 100\% \tag{8}$$

$$I_3 = \frac{n_5}{n_1} \times 100\% \tag{9}$$

式中 n_1 为已采枸杞熟果数量, 个; n_2 为未采枸杞熟果数量, 个; n_3 为已采枸杞未熟果数量, 个; n_4 为未采枸杞未熟果数量, 个; n_5 为已采枸杞熟果破损数量, 个。

4.2 Box-Behnken 设计试验

由于枸杞无限花序, 连续花果特点, 过高的激振强度会导致枸杞未熟果脱落, 影响后续产量。因此对于枸杞采收, 激振强度并不是越高越好, 以往对其他果实的研究表明, 合适的参数组合可以导致成熟果实选择性脱落^[43-45]。查阅文献综述并进行预试验, 当振动频率为 5~15 Hz 且振动幅度为 20~40 mm 时, 能够有效采收枸杞熟果^[9,11], 同时仿真结果表明使用不同的激振方式能够影响采收效果。因此, 选取它们作为试验因素进行 Box-Behnken 设计试验。因素编码如表 2 所示。

表 2 因素编码

Table 2 Codes of factors

编码 Codes	振动幅度 Vibration amplitude X_1 /mm	激振方式 Excitation modes X_2	振动频率 Vibration frequency X_3 /Hz
-1	20	上下同振 A	5
0	30	上静下振 B	10
1	40	上下反振 C	15

4.3 参数优化试验结果

试验采用三因素三水平二次正交旋转组合试验^[44-46], 因素编码如表 2 所示, 试验方案及结果如表 3 所示, 共进行 17 组试验, 每组试验进行 5 次, 每次激振时间为 5 s, 取 5 次试验的平均值作为该组试验的结果。试验方案设计及结果分析应用 Design-Expert 12 软件完成。

表 3 试验方案及结果

Table 3 Experiment schemes and results

序号 No.	振动幅度 Vibration amplitude x_1	激振方式 Excitation mode x_2	振动频率 Vibration frequency x_3	熟果采摘率 Picking rate of ripe fruit $I_1/\%$	未熟果误采率 Picking rate of unripe fruit $I_2/\%$	熟果损伤率 Damage rate of ripe fruit $I_3/\%$
1	-1	-1	0	79.07	3.38	11.76
2	1	-1	0	83.52	6.50	6.58
3	-1	1	0	88.35	5.41	3.30
4	1	1	0	97.41	21.33	3.54
5	-1	0	-1	82.35	2.42	8.16
6	1	0	-1	87.10	6.72	4.63
7	-1	0	1	87.25	3.25	4.49
8	1	0	1	96.69	13.40	1.71
9	0	-1	-1	80.41	4.03	11.54
10	0	1	-1	86.27	5.04	3.41
11	0	-1	1	83.47	5.35	3.96
12	0	1	1	98.40	17.46	4.07
13	0	0	0	92.62	4.38	2.65
14	0	0	0	89.91	3.79	2.04
15	0	0	0	88.39	1.65	3.03
16	0	0	0	91.23	2.59	6.73
17	0	0	0	95.04	0.81	2.99

4.3.1 试验结果回归分析

方差分析结果如表 4~表 6 所示, 由上述试验结果经 Design-Expert 12 软件进行二次回归拟合方程, 得到以各试验指标为响应函数、以各影响因素编码值为自变量的多项式回归方程为:

$$I_1 = 90.06 + 3.46x_1 + 5.5x_2 + 3.71x_3 - 2.95x_2^2 \tag{10}$$

表 4 熟果采摘率方差分析

Table 4 Variance analysis of the picking rate of ripe fruit

方差来源 Sources of variance (SV)	平方和 Sum of squares (SS)	自由度 Freedom of degree (FD)	均方差 Mean square (MS)	F	P
模型 Model	537.10	9	59.68	15.55	0.000 8
X_1	95.91	1	95.91	24.99	0.001 6
X_2	241.56	1	241.56	62.94	< 0.000 1
X_3	110.11	1	110.11	28.69	0.001 1
X_1X_2	5.31	1	5.31	1.38	0.277 8
X_1X_3	5.50	1	5.50	1.43	0.270 3
X_2X_3	20.57	1	20.57	5.36	0.053 8
X_1^2	10.38	1	10.38	2.70	0.1440
X_2^2	32.55	1	32.55	8.48	0.022 6
X_3^2	9.73	1	9.73	2.54	0.155 3
失拟项 Lack of fit (LF)	0.827 1	3	0.28	0.042 4	0.986 7
纯误差 Pure error (PE)	26.04	4	6.51		
总和 Sum	563.97	16			

表 5 未熟果误采率方差分析

Table 5 Variance analysis of the picking rate of unripe fruit

SV	SS	FD	MS	F	P
模型 Model	499.98	9	55.55	21.71	0.000 3
X_1	140.20	1	140.2	54.78	0.000 1
X_2	112.35	1	112.35	43.9	0.000 3
X_3	56.45	1	56.45	22.05	0.002 2
X_1X_2	40.96	1	40.96	16	0.005 2
X_1X_3	8.56	1	8.56	3.34	0.110 2
X_2X_3	30.80	1	30.8	12.04	0.010 4
X_1^2	26.19	1	26.19	10.24	0.015 1
X_2^2	67.93	1	67.93	26.54	0.001 3
X_3^2	7.22	1	7.22	2.82	0.137
LF	9.23	3	3.08	1.42	0.361
PE	8.68	4	2.17		
总和 Sum	517.89	16			

表6 熟果损伤率方差分析

Table 6 Variance analysis of the damage rate of ripe fruit

SV	SS	FD	MS	F	P
模型	131.33	9	14.59	6.58	0.010 6
X_1	15.82	1	15.82	7.13	0.032
X_2	47.63	1	47.63	21.47	0.002 4
X_3	22.82	1	22.82	10.28	0.014 9
X_1X_2	7.34	1	7.34	3.31	0.111 7
X_1X_3	0.140 6	1	0.140 6	0.063 4	0.808 5
X_2X_3	16.97	1	16.97	7.65	0.027 8
X_1^2	3.45	1	3.45	1.55	0.252 7
X_2^2	15.24	1	15.24	6.87	0.034 4
X_3^2	0.529 9	1	0.529 9	0.238 9	0.64
LF	1.76	3	0.587 3	0.170 6	0.911
PE	13.77	4	3.44		
总和 Sum	146.86	16			

$$I_2 = 3.2 + 4.19x_1 + 3.75x_2 + 2.66x_3 + 3.2x_1x_2 + 2.77x_2x_3 + 2.56x_1^2 + 4.09x_2^2 \quad (11)$$

$$I_3 = 4.05 - 1.41x_1 - 2.44x_2 - 1.69x_3 + 2.06x_2x_3 + 1.97x_2^2 \quad (12)$$

由表4~表6可知: 熟果采摘率回归模型 P 值小于 0.05, 模型具有统计学意义; 因子 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_2^2 对熟果采摘率的影响显著 ($P < 0.05$); 未熟果误采率回归模型 P 值小于 0.05, 模型具有统计学意义; 因子 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_2X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 对未熟果误采率的影响显著 ($P < 0.05$); 熟果损伤率回归模型 P 值小于 0.05, 模型具有统计学意义; 因子 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_2X_3 、 X_2^2 对熟果损伤率的影响显著 ($P < 0.05$); 所有分析的失拟项 P 值大于 0.05, 表明回归方程无失拟因素存在。

4.3.2 试验结果响应曲面分析

分析各试验因素对熟果采摘率的影响。由式(10)和表4可知, 各因素间交互作用影响不显著。随着振动幅度与振动频率的提高, 熟果采摘率逐渐增加。这是因

为振动强度越大熟果越容易脱落。同时由于结构限制, 采摘机振动幅度与振动频率难以进一步提高, 且继续提高会对其他评价指标造成不良影响; 3种激振方式从A到C, 熟果采摘率逐渐增加, 这与仿真结果一致。

分析各试验因素对未熟果误采率的影响。由式(11)和表5可知, 其中激振方式分别与振动幅度和振动频率间交互作用影响显著, 响应面分析如图13a、13b所示。随着振动幅度与振动频率的提高, 未熟果误采率逐渐增大, 这是因为未熟果误采率与振动强度直接相关, 当振动强度过大时, 未熟果所受惯性力大于结合力, 导致误采。3种激振方式从A到C, 熟果采摘率逐渐增大, 这是由于枝条末端未熟果成簇生长且枝条较细, 采用方式C时振动强度过大, 枝条末端摆动加剧, 可能会出现枝条末端未熟果整簇掉落, 甚至出现断枝现象, 导致未熟果误采率快速增加。而采用方式A时振动强度较低, 采摘效果不佳, 每次振动采摘范围较小, 对同一根枝条需要多次激振, 也会导致未熟果误采率较大。

分析各试验因素对熟果损伤率的影响。由式(12)和表6可知, 激振方式与振动频率间交互作用影响显著, 响应面分析如图13c所示。随着振动幅度与振动频率的提高, 以及3种激振方式从A到C, 熟果损伤率逐渐减小, 这与实际采摘经验不同, 然而这是因为当振动强度过小时, 难以保证在不接触枸杞果实的情况下将果实振落, 实际采摘时容易出现振动杆梳刷击打枸杞熟果使其脱落的情况, 导致果实损伤, 这种情况在采用方式A采摘时常常出现。而当采用方式B和C时, 振动强度达到一定程度后, 可以实现如采摘原理所述, 在无需直接接触果实的情况下, 一次性将熟果采摘下来, 从而提高采摘效果。

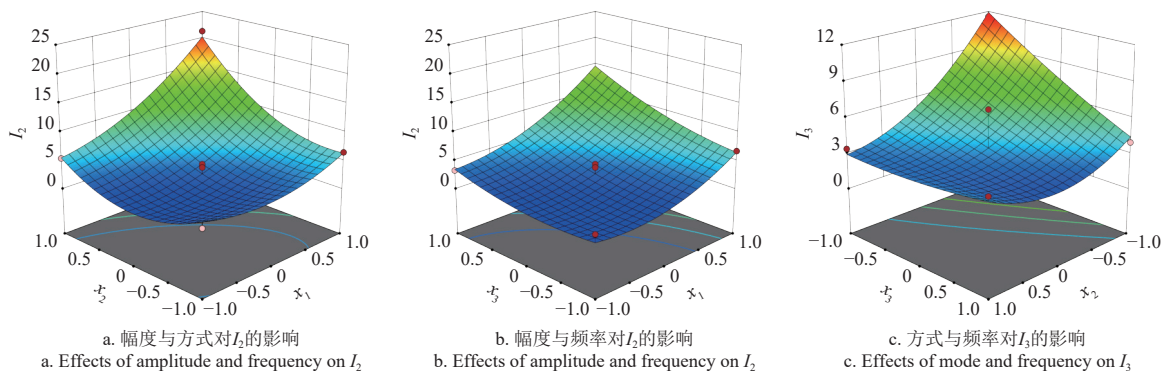


图13 响应曲面
Fig.13 Response surface

4.3.3 优化参数试验

采用 Design-Expert 12 软件对熟果采摘率 I_1 、未熟果误采率 I_2 和熟果损伤率 I_3 三个评价指标进行优化, 优化目标如式(13), 同时由于采摘机的主要目标为提高熟果采摘率, 因此根据经验取3种评价指标权重分配比为4:3:3。求解获得各因素的最佳参数组合为: 振动幅度 31.13 mm、激振方式为上静下振、振动频率 12.59 Hz。

$$\begin{cases} \max I_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min I_2(X_1, X_2, X_3) \\ \min I_3(X_1, X_2, X_3) \\ 20 \text{ mm} \leq X_1 \leq 40 \text{ mm} \\ X_2 = A/B/C \\ 5 \text{ Hz} \leq X_3 \leq 15 \text{ Hz} \end{cases} \quad (13)$$

为消除试验中的随机误差, 在田间选取不同枝条,

试验共重复 10 次, 激振时间为 5 s, 在最优参数试验中, 用柔性布收集落果, 根据颜色人工判断果实的成熟度, 随后计算收获果实和未收获果实的数量, 并依次仔细观察收获的成熟果实表面是否有损伤, 从而得到成熟果实的损伤数量。试验过程如图 14 所示。最优参数试验结果表明: 采摘成熟果实 235 个, 未成熟果实 13 个; 未采摘成熟果实 12 个, 未成熟果实 269 个; 成熟果实损伤 9 个。试验结果表明, 熟果采摘率为 95.14%, 未熟果误采率为 4.61%, 熟果损伤率为 2.98%, 本次试验在振动过程中, 振动设备夹紧成熟果实区域上方, 无需直接接触即可将成熟果实一次性振动下来, 实现摘熟留青, 高效采收的效果。

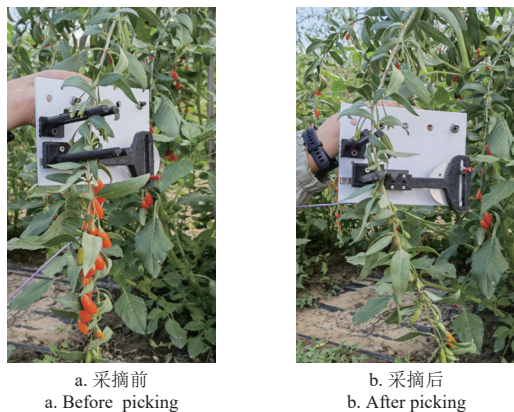


图 14 振动采摘田间试验
Fig.14 Field test for vibration picking

本研究验证了无需直接接触果实的振动采摘方法的可行性, 为后续大型机械化采收设备的研制和试验提供了参考。但本文参数试验只考虑了 3 个因素: 振动幅度、激振方式和振动频率。在振动采收中, 还有一些其他因素可能会影响枸杞的采收效果, 如激振时间、材料疲劳、以及相邻果实之间的相互作用, 在未来的研究中需考虑这些因素进行深入分析。

5 结 论

1) 根据枸杞无限花序的特点与果-花-叶脱落加速度分布顺序, 提出一种无需直接接触果实的振动采摘方法。

2) 为研究枸杞不同激振方式的采收效果, 提出上下同振、上静下振、上下反振的 3 种激振方式并设计相应的采摘机。通过瞬态动力学仿真试验方法, 获得不同激振方式下枝条的振动响应, 仿真结果表明, 不同的激振方式对枸杞枝条的振动响应有一定影响。

3) 通过 ADAMS 运动学与动力学仿真的试验方法, 发现振动响应从振动头到枝条, 再到果实逐渐变大。验证仿真结果表明枝条振幅的平均相对误差为 23.78%, 果实速度的平均相对误差为 14.01%。验证了使用仿真手段模拟枸杞枝-柄-果的振动响应的有效性。

4) 通过正交组合试验, 建立熟果采摘率、未熟果误采率、熟果损伤率与振动幅度、激振方式、振动频率之间的数学模型, 确定最佳参数组合: 振动幅度 31.13 mm、激振方式上静下振、振动频率 12.59 Hz。并进行田间试

验验证。田间试验表明, 熟果采摘率为 95.14%, 未熟果误采率为 4.61%, 熟果损伤率为 2.98%。

[参 考 文 献]

- [1] CHEN Q, ZHANG S, HU G, et al. Parameter optimization of the harvest method in the standardized hedge cultivation mode of lycium barbarum using response surface methodology[J]. *Horticulturae*, 2022, 8(4): 308.
- [2] 赵健. 枸杞振刷采收关键技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
ZHAO Jian. Key Technologies of Vibrating and Comb Brushing Harvesting for *Lycium barbarum* L. [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [3] 徐丽明, 陈俊威, 吴刚, 等. 梳刷振动式枸杞收获装置设计与运行参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 75-82.
XU Liming, CHEN Junwei, WU Gang, et al. Design and operating parameter optimization of comb brush vibratory harvesting device for wolfberry[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(9): 75-82. (in Chinese with English abstract)
- [4] ZHAO J, CHEN J. Detecting maturity in fresh *Lycium barbarum* L. fruit using color information[J]. *Horticulturae*, 2021, 7(5): 108.
- [5] 马嘉伟. 我国枸杞机械化采摘技术的现状及发展趋势[J]. 机械研究与应用, 2017, 30(4): 151-153.
MA Jiawei. Research status and prospect of the mechanized technology of picking wolfberry in China[J]. *Mechanical Research & Application*, 2017, 30(4): 151-153. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李强, 叶力勤, 安巍. 枸杞采摘机的适采条件[J]. 农机化研究, 2009, 31(6): 126-128.
LI Qiang, YE Liqin, AN Wei. The suitable working of wolfberry harvest machine[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009, 31(6): 126-128. (in Chinese with English abstract)
- [7] 曾涛, 刘斌, 石胜强. 枸杞真空冷冻干燥动力学的数值模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(6): 259-268.
ZENG Tao, LIU Bin, SHI Shengqiang. Numerical simulation and analysis of the vacuum freeze drying kinetics of *Lycium barbarum*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(6): 259-268. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王荣炎, 郑志安, 徐丽明, 等. 枸杞果实振动脱落特性模拟仿真及试验研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(10): 120-128.
WANG Rongyan, ZHENG Zhi'an, XU Liming, et al. Simulation and experiment on vibration characteristics of lycium barbarum falling off[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(10): 120-128. (in Chinese with English abstract)
- [9] 胡明明, 万芳新, 杜小龙, 等. 振动式枸杞采摘机设计[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(7): 25-29.
HU Mingming, WAN Fangxin, DU Xiaolong, et al. Design of vibrating wolfberry picking machine[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2018, 39(7): 25-29. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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 with English abstract)
- [11] 张文强, 李召召, 谭豫之, 等. 变间距梳刷式枸杞采收装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 83-90.
ZHANG Wenqiang, LI Zhaozhao, TAN Yuzhi, et al. Optimal

- design and experiment on variable pacing combing brush picking device for lycium barbarum[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 83-90. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陈军, 赵健, 陈云, 等. 振刷式枸杞采收机设计与试验优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 152-161, 95. CHEN Jun, ZHAO Jian, CHEN Yun, et al. Design and experiment on vibrating and comb brushing harvester for lycium barbarum[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 152-161, 95. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘星星, 车金宁, 杨潇, 等. 枸杞株间电驱动避障除草机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 104-114. LIU Xingxing, CHE Jinning, YANG Xiao, et al. Design and test of the intra-row electric driven obstacle avoidance weeder for wolfberry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(23): 104-114.
- [14] 梅松, 唐敦兵, 石志刚, 等. 基于阵列化振动单元的枸杞采收机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 115-125. MEI Song, TANG Dunbing, SHI Zhigang, et al. Design and test of a Chinese wolfberry harvester using arrayed vibration units[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(23): 115-125. (in Chinese with English abstract)
- [15] 彭要, 张正勇, 刘洋, 等. 精准夹持振动式枸杞采摘装置设计与实验[J]. 机械研究与应用, 2018, 31(6): 123-129, 132. PENG Yao, ZHANG Zhengyong, LIU Yang, et al. Design and experiment of accurate clamping vibration wolfberry harvesting machine[J]. Mechanical Research & Application, 2018, 31(6): 123-129, 132. (in Chinese with English abstract)
- [16] DU X, SHEN T, ZHAO L, et al. Design and experiment of the comb-brush harvesting machine with variable spacing for oil-tea camellia fruit[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(1): 172-177.
- [17] FERREIRA J, SILVA F, FERREIRA D, et al. Dynamic behavior of coffee tree branches during mechanical harvest[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 105415.
- [18] CASTRO-GARCIA S, SOLA-GUIRADO R, GIL-RIBES J. Vibration analysis of the fruit detachment process in late-season 'Valencia' orange with canopy shaker technology[J]. Biosystems Engineering, 2018, 170: 130-137.
- [19] 梁晓婕, 安巍, 戴国礼, 等. 不同枸杞品种(系)的根系生长特征[J]. 北方园艺, 2018(22): 149-153. LIANG Xiaojie, AN Wei, DAI Guoli, et al. Root growth characteristics of different wolfberry varieties(Lines)[J]. Northern Horticulture, 2018(22): 149-153. (in Chinese with English abstract)
- [20] 梁晓婕, 段淋渊, 安巍, 等. 宁夏枸杞根系生长发育特征研究[J]. 西北农业学报, 2020, 29(4): 622-629. LIANG Xiaojie, DUAN Linyuan, AN Wei, et al. Growth and development characteristics of roots of *Lycium barbarum* L.[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2020, 29(4): 622-629. (in Chinese with English abstract)
- [21] 吕燕, 刘建利, 李靖宇, 等. 不同品种和产区宁夏枸杞根系AMF多样性[J]. 生物技术通报, 2021, 37(6): 36-48. LV Yan, LIU Jianli, LI Jingyu, et al. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi inhabiting the roots of *Lycium barbarum* in different varieties and cultivation regions[J]. Biotechnology Bulletin, 2021, 37(6): 36-48. (in Chinese with English abstract)
- [22] 赵健, 陈云, 王亚磊, 等. 便携式枸杞振动采摘装置参数优化试验研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(3): 176-182. ZHAO Jian, CHEN Yun, WANG Yalei, et al. Experimental research on parameter optimization of portable vibrating and harvesting device of Chinese wolfberry[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(3): 176-182. (in Chinese with English abstract)
- [23] MEI S, TANG D B, SHI Z G, et al. Energy consumption mechanism simulation analysis and experimental study of reciprocating vibration for Chinese wolfberry picking[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(4): 146-155.
- [24] 何苗, 坎杂, 李成松, 等. 枸杞振动采摘机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 47-53. HE Miao, KAN Za, LI Chengsong, et al. Mechanism analysis and experiment on vibration harvesting of wolfberry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(11): 47-53. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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.
- [26] WEI J, YANG G Y, YAN H. Rigid-flexible coupling simulation and experimental vibration analysis of pistachio tree for optimal mechanized harvesting efficiency[J]. Mechanical Advances in Materials and Structures, 2020, 28(22): 2360-2369.
- [27] MEI S, WANG J P, SONG Z Y, et al. Mechanism and experimental study on the fruit detachment of chinese wolfberry through reciprocating vibration[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(2): 47-58.
- [28] ZHANG X, HE L, KARKEE M, et al. Field evaluation of targeted shake-and-catch harvesting technologies for fresh market apple[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(6): 1759-1771.
- [29] ZHOU J, XU L, XUAN Y, et al. Shedding frequency and motion of jujube fruits in various excitation modes[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(4): 881-889.
- [30] ZHOU J, XU L, ZHANG A, et al. Finite element explicit dynamics simulation of motion and shedding of jujube fruits under forced vibration[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107009.
- [31] BU L, CHEN C, HU G, et al. Investigating the dynamic behavior of an apple branch-stem-fruit model using experimental and simulation analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 186: 106224.
- [32] HU G, BU L, CHEN J, et al. Simulation to determination of significant parameters on apple stress for combing harvesting in trellis trained trees[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 274: 109329.
- [33] JUN P, XIE H, FENG Y, et al. Simulation study of vibratory harvesting of chinese winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143: 57-65.
- [34] NIU Z, XU Z, DENG J, et al. Optimal vibration parameters for olive harvesting from finite element analysis and vibration tests[J]. Biosystems Engineering, 2022, 215: 228-238.
- [35] VILLIBOR G, SANTOS F, QUEIROZ D, et al. Dynamic behavior of coffee fruit-stem system using modeling of flexible bodies[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 105009.
- [36] WANG R, ZHENG Z, LU X, et al. Design, simulation and test of roller comb type chrysanthemum (*Dendranthema morifolium* Ramat) picking machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106295.
- [37] ZHAO J, MA T, INAGAKI T, et al. Finite element method simulations and experiments of detachments of *Lycium barbarum* L.[J]. Forests, 2021, 12(6): 699.
- [38] 李乐凯. 基于振动式采摘的枸杞植株生物力学关键特性研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2020. LI Lekai. Research on the Biomechanical Characteristic of Wolfberry Plant Based on the Vibrating Harvesting[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020. (in Chinese with English abstract)

- abstract)
- [39] CASTRO-GARCIA S, ARAGON-RODRIGUEZ F, ARIAS-CALDERON R, et al. The contribution of fruit and leaves to the dynamic response of secondary branches of orange trees[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 193: 149-156.
- [40] 许林云, 刘冠华, 周杰, 等. 用于振动采摘的有果有叶果树振动模型构建[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 1-12.
- XU Linyun, LIU Guanhua, ZHOU Jie, et al. Construction of the vibration model of the fruit trees with fruits and leaves for vibration harvesting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(11): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [41] ZHAO J, MA T, INAGAKI T, et al. Parameter optimization of vibrating and comb-brushing harvesting of *Lycium barbarum* L. based on FEM and RSM[J]. *Horticulturae*, 2021, 7(9): 286.
- [42] 徐勤超, 单程, 陈昊义, 等. 猕猴桃大帐气调气流组织的数值模拟及优化[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(5): 307-316.
- XU Qingchao, DAN Chen, CHEN Haoyi, et al. Numerical simulation and optimization of air distribution in kiwifruit controlled atmosphere pallet bags[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(5): 307-316. (in Chinese with English abstract)
- [43] CHEN Y, ZHAO J, CHEN Q, et al. Simulation for fitting the bending shape of fruit branches of *Lycium barbarum* based on the finite element method[J]. *Horticulturae*, 2021, 7(11), 434.
- [44] 王丹华, 汤邝杰, 曾雷, 等. 响应面法优化提取五指毛桃总香豆素及其抗氧化活性研究[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2023, 36(4): 45-51.
- WANG Danhua, TANG Kuangjie, ZENG Lei, et al. Extraction process optimization of total coumarins by response surface methodology from *Ficus hirta* and evaluation of their antioxidant activity[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 2023, 36(4): 45-51. (in Chinese with English abstract)
- [45] ZHAO J, SUGIRBAY A, LIU F, et al. Parameter optimization of winnowing equipment for machine-harvested *Lycium barbarum* L.[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2019, 17(2): e0203.
- [46] 林泽钜, 刘巧瑜, 白卫东, 等. 响应面法优化小米威风蛋糕配方研究[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2023, 36(2): 12-20.
- LIN Zeqian, LIU Qiaoyu, BAI Weidong, et al. Optimization of formulation of millet chiffon cake by response surface methodology[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 2023, 36(2): 12-20. (in Chinese with English abstract)

Optimizing the parameters for the vibration harvesting of *Lycium barbarum* L. under various excitation modes

CHEN Qingyu, ZHANG Shixia, WEI Naishuo, FAN Yunlei, ZHANG Wei, WANG Zeyu, CHEN Jun^{*}, CHEN Yu

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: *Lycium barbarum* L. (*L. barbarum*) has been one of the most favorite fruits in recent years. However, manual harvesting cannot fully meet large-scale production, as the labor force decreases. It is urgent to realize efficient harvesting by picking ripe fruits rather than unripe ones. This study aims to optimize the parameters during vibration harvesting of *L. barbarum* under various excitation modes. The *L. barbarum* fruits were also selected and measured in Ningxia in western China. The normal distribution of the detachment force and detachment acceleration were plotted after measurement. It was found that the detachment force of ripe fruits was similar to that of flowers. There were overlapping areas among the unripe fruits and leaves. By contrast, the detachment acceleration was ranked in the ascending order of the ripe fruits, unripe fruits, leaves, and flowers. Ripe fruits also presented the lowest detachment acceleration without overlapping with the rest, suitable for the vibration to harvest *L. barbarum*. As such, the vibration-picking was employed without touching the fruits. Only the excitation area above the ripe fruit area of the branch was excited by vibration equipment, according to the characteristic of infinite inflorescence. Furthermore, the vibration head was closer to the ripe fruit area during harvesting, particularly without colliding with the ripe fruits for less damage. Three excitation modes were proposed for the branch in the corresponding vibration equipment. The upper and lower points vibrated in the same direction (simultaneous vibration); the upper point was fixed, and the lower point made a reciprocating vibration (pendulum vibration); the upper and lower points vibrated in the opposite direction (reverse vibration). The kinematics model of the clamping head was established to simulate the branch and branch-stalk fruit. The transient analysis was implemented to obtain the vibration responses of the branch under different excitation modes. The results show that the excitation modes dominated the vibration response of the branch. Moreover, the vibration response of the fruit under excitation was acquired via kinematics simulation of ADAMS. The mechanism of fruit shedding was analyzed after simulation. The results indicate that the vibration response gradually increased from the vibration head to the selection point of the branch, and then to the fruit. The verification test showed that the average relative error of branch amplitude and fruit velocity were 23.78% and 14.01%, respectively. The vibration response of *L. barbarum* branch, stalk, and fruit was verified after the test. The parameter experiment was taken by the Box-Behnken test. The mathematical models were then established for the picking rate of ripe fruit, picking rate of unripe fruit, damage rate of ripe fruit and vibration amplitude, excitation mode, and vibration frequency. The influences of various factors were analyzed to determine the optimal combination of parameters: the vibration amplitude was 31.13 mm; the excitation mode was pendulum vibration, and the vibration frequency was 12.59 Hz. The experiments with the optimal parameters show that the picking rates of ripe and unripe fruit were 95.14% and 4.61%, respectively, and the damage rate of ripe fruit was 2.98%. A better performance was achieved in the pendulum vibration as the optimal excitation mode. Fruit damage was minimized due to the high picking efficiency, particularly for ripe fruits. The findings can also provide valuable insights into the mechanized harvesting equipment for *L. barbarum* fruits.

Keywords: *L. barbarum*; vibration harvesting; excitation mode; shedding mechanism; simulation; response surface method