doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.024

抓摇式设施冬枣摘熟留青振动采收装置参数优化与试验

郑洲洲[1]　胡耀华[2]　赵鹏飞[1]　董建鑫[1]　黄玉祥[1,3]

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 浙江农林大学光机电工程学院, 杭州 311300;
3. 陕西省农业装备工程研究中心, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为实现冬枣摘熟留青分批收获,针对设施枣园种植环境设计了一款用于冬枣振动采收参数寻优,具有信息感知功能可调幅变频的试验装置。为探究受迫振动下影响枣果脱落的主要因素,获得最大熟果脱落率和最小青果脱落率,构建了果实单摆动力学模型,通过对模型的求解,确定了影响果实脱落的主要因素为振动频率、振动幅值和振动时间。然后,采用显示推拉计进行脱落模拟试验,确定了熟果、青果、果柄的脱落次序,证明了摘熟留青的可行性。最后,建立了脱落率与采收机收获参数数学模型,以熟果脱落率和青果脱落率为指标对采收参数进行优化,得到冬枣摘熟留青最佳参数组合:振动频率为 12.66 Hz、振动幅值为 15.02 mm、振动时间为 3.98 s,此时,熟果脱落率为 70.08%,青果脱落率为 11.97%。并对优化结果进行了田间试验验证,试验结果与优化值相近。

关键词: 设施枣园; 冬枣; 摘熟留青; 抓摇式振动采收装置; 参数优化

中图分类号: S225.93　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0245-09　　**OSID**:

Optimization and Test of Ripe-picking and Green-leaving Harvesting Parameters for Winter Jujube Catch-and-shake Vibration Device under Facility Orchard

ZHENG Zhouzhou[1]　HU Yaohua[2]　ZHAO Pengfei[1]　DONG Jianxin[1]　HUANG Yuxiang[1,3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *College of Optical, Mechanical and Electrical Engineering, Zhejiang A&F University, Hangzhou* 311300, *China*
3. *Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: To achieve the ripe-picking and green-leaving harvesting of winter jujube, and considering the planting environment of facility jujube orchards, an adjustable-amplitude, variable-frequency test device with information sensing capabilities was designed to find the vibration harvesting parameters of winter jujube. The main factors affecting the shedding of jujube fruits under forced vibration were explored to obtain the maximum shedding rate of ripe fruits and the minimum shedding rate of green fruits. A fruit pendulum dynamics model was constructed to solve the model and determine that the main factors affecting fruit shedding were vibration frequency, vibration amplitude and vibration time. Then a shedding simulation test was carried out on a display push-pull meter to determine the shedding order of ripe fruits, green fruits and fruit stalks, which proved the feasibility of picking ripe fruits and leaving green ones. Finally, the mathematical model between the shedding rate and the harvesting parameters of the harvester was established. The harvesting parameters were optimized with the ripe fruit shedding rate and green fruit shedding rate as indicators, and the optimal parameter combination for picking ripe winter jujube and leaving green jujube was obtained as follows: the shedding rate of ripe fruit was 70.08%, and the shedding rate of green fruit was 11.97% when the vibration frequency was 12.66 Hz, the vibration amplitude was 15.02 mm, and the vibration time was 3.98 s. The optimization results were verified by field tests, and the test results were close to the optimized values.

Key words: facility jujube orchards; winter jujube; ripe-picking and green-leaving; catch-and-shake vibration harvesting device; parameter optimization

收稿日期: 2024-08-13　修回日期: 2024-09-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2000401-2)和国家自然科学基金项目(32372009)

作者简介: 郑洲洲(1996—),男,博士生,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: zhengzz@nwafu.edu.cn

通信作者: 黄玉祥(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: hyx@nwsuaf.edu.cn

0 引言

冬枣,又名苹果枣、冰糖枣、雁来红,是枣属内著名的一个晚熟鲜食品种,主要分布在山东、陕西、山西、新疆等地区[1-2]。冬枣因其良好的口感和丰富的营养价值受到越来越多消费者喜爱[3-4]。目前,冬枣的采收主要以人工采收为主,随着农村劳动力的转移,冬枣收获期雇工难问题变得日益突出[5-6],研究冬枣机械化采收装置成为亟待解决的难题。振动采收目前作为林果采收的主要手段,以其高效率、低成本和操作简单等优点被广泛运用于林果的收获。分析研究不同振动采摘参数对林果脱落的影响尤为重要[7]。

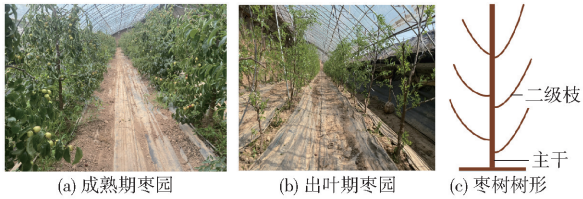
近年来,国内外许多研究聚焦于林果的脱落特性[8-10]。闫德等[11]针对葡萄夹剪断梗过程中振动激励带来的果实-分梗动力学模型,通过对模型求解探明了葡萄的振动脱落特性。韩元顺等[12]采用高速摄影技术追踪振动模式下板栗果实动态脱落过程,明确了板栗果实脱落分离的主要方式,确定了最佳的振动幅值和频率。何荣[13]分析了受迫振动下红枣果实果柄分离条件,推导了迫使果实脱落惯性力表达式。伍德林等[14]建立了油茶"果实-枝条"双摆动力学模型,分析了果实和花苞的受力情况,得到了果实脱落所需的加速度。谯懿宸[15]建立了红枣"果实-枝条"单摆的动力学模型,分析了红枣果实脱落条件,针对不同直径红枣树进行了动力学分析,得到了不同直径红枣树振动采收最佳参数组合。王荣炎等[16]探究了枸杞果实-果柄振动分离特性,揭示了枸杞振动脱落机理。赵健[17]三维重建了枸杞青熟果、果柄和枝条模型,通过脱落模拟与试验探明了枸杞青熟果脱落机理。

枸杞、油茶和红枣的摘熟留青对冬枣振动收获提供了参考,彭俊等[18]完成了未熟期、白熟期和脆熟期果实、果柄物理参数测量,并测量了这 3 个时期果实分离力差别,但是这项研究并没有揭示不同时期冬枣分离特性和机理。由于冬枣鲜食性和皮薄等特点,容易在振动收获中损伤从而影响冬枣的食用性,所以针对冬枣振动模式下脱落特性尚不明确,冬枣机械化收获装置较少。文献[19-20]探究机械收获中合理的缓冲材料和下落高度避免冬枣损伤的可能性,证明了冬枣振动收获的可行性。综上所述,本研究针对设施冬枣园枣树特点,建立冬枣果实单摆动力学模型,通过对模型的求解得到影响冬枣枣果脱落的主要因素。此外,通过青熟果脱落模拟试验探明青熟果脱落的次序。最后,进行多因素试验探究不同参数对青熟果脱落率的影响,得到冬枣摘熟留青最优参数组合,并通过田间试验验证在该参数下能够保证最大熟果脱落率和最小青果脱落率。

1 试验装置设计

1.1 抓摇收获装置试验平台

首先对如图 1a 所示的成熟期杨凌设施枣园进行调研,获得大棚中枣树农艺参数,得到设施枣园种植农艺参数:行距为(1.7±0.1) m、株距为(1.0±0.2) m、株高为 1.5~2.1 m、蓬径为 0.5~1.1 m、作业行宽度为 1.0~1.2 m、枣树直径为(30±10) mm、树龄为 5 a。如图 1b 所示,由于设施枣园枣树规范化的种植模式,枣树行间作业空间较大,为机械化收获提供了可能。结合杨凌设施枣园的结构特点,本研究采用移动平台搭载采收装置进行冬枣的机械化采收试验。



(a) 成熟期枣园 (b) 出叶期枣园 (c) 枣树树形

图 1 杨凌设施枣园及冬枣树树形

Fig. 1 Yangling jujube orchard and winter jujube tree shape

结合图 1c 所示的枣树树形特点,杨凌设施枣园枣树分支主要集中在主干的大部分,呈现一主干多分支的特点,这种树形特点增加了抓摇式收获的难度,各向异性的分支走向容易碰坏抓摇执行末端,因此需要采收试验装置能够调整高度,抓取无二级枝的主干保证机械爪的安全。

因此本研究设计一种带自主升降平台的抓摇式采收试验装置,如图 2 所示,该采收试验装置主要包括感知传感器单目相机和深度相机、可调幅变频振动装置[15]、机械爪、滑轨、升降平台和移动平台。调幅变频振动装置具体结构如图 3 所示,调幅电机转动将力矩通过调幅齿轮和推杆传递至调幅盘,使得调幅盘沿着传动轴轴向运动从而推动振动盘倾斜一定角度,具有一定倾角的振动盘在转动的过程中能够控制振动杆振动幅度实现调幅操作,调节不同的倾角对应不同幅值。

工作流程如图 4 所示,单目相机用于自主导航,深度相机用于识别安全抓摇位点,控制器控制升降平台升降,携带机械爪的振动装置在电动推杆推动下接近安全的抓摇位点,最终振动装置启动完成振动采收。

装置实物如图 5 所示,该采收装置长 1.2 m,宽

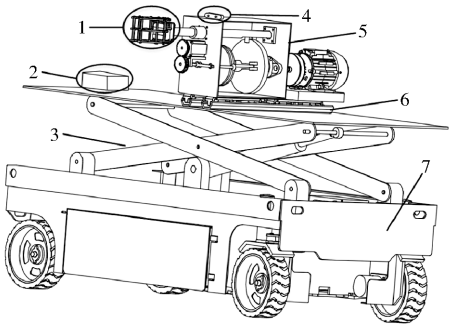


图 2　冬枣采收试验装置整体结构图

Fig. 2　Overall structure diagram of winter jujube harvesting test device

1. 机械爪　2. 单目相机　3. 升降平台　4. 深度相机　5. 振动装置　6. 滑轨　7. 移动平台

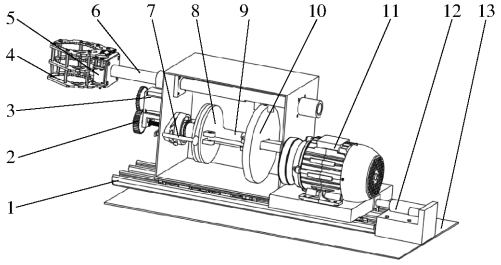


图 3　振动装置结构简图

Fig. 3　Structure diagram of vibration device

1. 滑轨　2. 调幅齿轮　3. 调幅电机　4. 机械爪　5. 舵机　6. 振动杆　7. 推杆　8. 调幅盘　9. 传动轴　10. 振动盘　11. 调频电机　12. 电动推杆　13. 底座

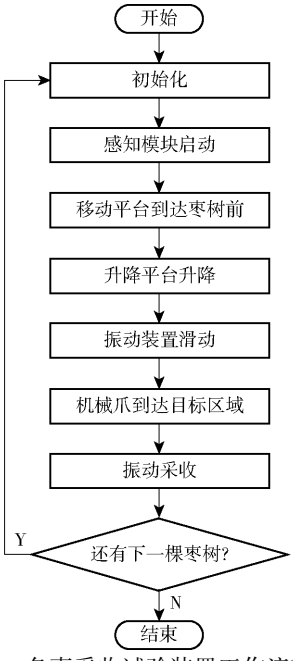


图 4　冬枣采收试验装置工作流程图

Fig. 4　Workflow diagram of winter jujube harvesting test device

0.8 m，设计滑轨长度为 1 m，机械爪可沿滑轨最大伸出长度为 0.3 m，在升降平台未升降前，机械爪距地面高度为 0.75 m，升降平台可实现 0 ~ 1 m 的升降范围，可实现树体 0.75 ~ 1.75 m 高度的抓摇振动。该装置可实现 0 ~ 50 Hz 的调频范围，可实现 5 ~ 30 mm 的调幅范围。



图 5　冬枣采收试验装置实物图

Fig. 5　Actual diagram of winter jujube harvesting test device

1.2　显示推拉力测试

为测定青熟果果实果柄的脱落次序，采用如图 6 所示的显示推拉力测试平台进行拉力试验。测试平台包括 HP－20 型数显推拉计（精度 0.001 N，测量范围 0 ~ 20 N）、螺旋测试台、果柄卡钳、吸盘式台钳、数据传输线和数据记录软件。螺旋测试台作为数显推拉计支架固定推拉计和通过旋转手柄控制推拉计完成拉压试验。果柄卡钳和吸盘式台钳分别用于夹持果柄和冬枣果实。数据记录软件可以记录拉力随时间的变化。

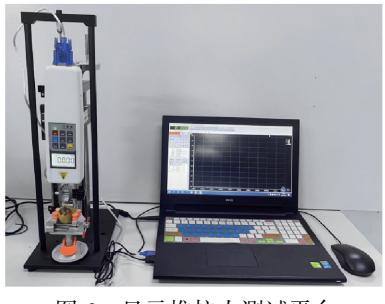


图 6　显示推拉力测试平台

Fig. 6　Display push and pull force test platform

2　冬枣果实脱落动力学模型构建

2.1　单摆动力学模型建立

采用抓摇式振动采收的方式实现冬枣熟果的脱落和青果的保留。在振动过程中，枣果运动状态复杂。探究激振状态下影响枣果果实脱落的主要因素是实现摘熟留青的前提条件。振动状态下常见的果实运动形式可以分为两种：长柄果实，其运动形式主要表现为摆动、扭转和摇动等形式的复合运动；短柄果实，其运动形式主要表现为摆动运动[15,21－22]。冬枣果实长轴长度远大于果柄长度，在受迫运动下，冬枣主要运动形式以摆动为主。为简化模型，将冬枣

摆动形式认为其符合单摆的运动规律,即将果柄简化为一定长度的摆线,果实简化为球体[23-25]。如图 7 所示,定义果实在受迫运动前所处的位置在 xOy 坐标系内,当在简谐载荷 F_j 的作用下,树体开始运动,枝条到达新的位置,此时果实所处的位置在 $x'Oy'$。受迫运动下果实摆动角度为 θ,果柄与枝条接触点在 x 方向位移为 x_0,y 方向位移为 y_0,接触点到果实质心的距离为 l。

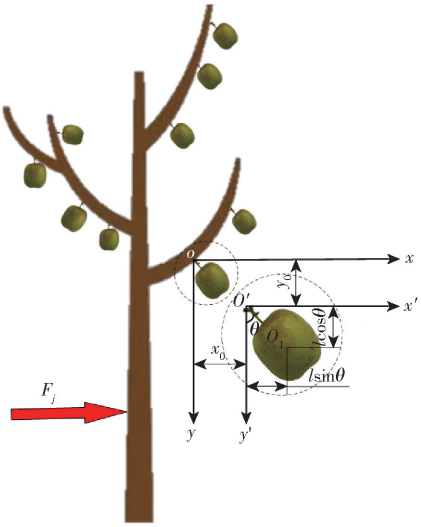


图 7 受迫振动下冬枣果实运动示意图

Fig. 7 Schematic of movement of winter jujube fruit under forced vibration

冬枣枝条呈现一主干多分支特点,振动能量通过主干传递至挂果枝条,挂果枝条通过果柄悬挂果实,由于冬枣主要的运动形式以摆动为主,故建立简化的单摆模型分析冬枣的运动。冬枣果实在激振力的作用下产生振动,根据图 7 所示的冬枣受迫前后运动示意图,果实的动能 T 和势能 V 公式为

$$T=\frac{1}{2}m(\dot{x}_0^2+\dot{y}_0^2)+\frac{1}{2}m\dot{\theta}^2l^2+\frac{1}{2}M(\dot{x}^2+\dot{y}^2)+\frac{1}{2}I_c\dot{\theta}^2 \tag{1}$$

$$V=-\frac{1}{2}k\theta^2+Mgy_0-Mgl+Mgl\cos\theta+mgy_0 \tag{2}$$

式中 m——挂果枝条的质量

M——果实质量 I_c——果实转动惯量

k——等效弹性系数

根据式(1)、(2)建立拉格朗日函数

$$L=T-V=\frac{1}{2}m(\dot{x}_0^2+\dot{y}_0^2)+\frac{1}{2}m\dot{\theta}^2l^2+\frac{1}{2}M(\dot{x}^2+\dot{y}^2)+\frac{1}{2}I_c\dot{\theta}^2+\frac{1}{2}k\theta^2-Mgy_0+Mgl-Mgl\cos\theta-mgy_0 \tag{3}$$

建立拉格朗日方程

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial\dot{\theta}}\right)-\frac{\partial L}{\partial\theta}=0 \tag{4}$$

如图 7 所示,在冬枣枝条激振的单摆模型中,存在几何关系

$$\begin{cases}x=x_0\pm l\sin\theta\\ y=y_0\pm l\cos\theta\end{cases} \tag{5}$$

将式(5)和式(3)代入式(4)化简得

$$ml^2\ddot{\theta}+M\ddot{x}_0l\cos\theta+Ml^2\ddot{\theta}\cos^2\theta-M\ddot{y}_0l\sin\theta+Ml\dot{\theta}\sin^2\theta+I_c\ddot{\theta}-k\theta-Mgl\sin\theta=0 \tag{6}$$

冬枣在受迫振动下,运动状态近似为单摆运动,故式(6)中参数近似为 $\sin\theta=\theta$,$\cos\theta=1$,整理式(6)得

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

2.2 单摆动力学模型求解

在振动的过程中,果实的运动是由于枝条的运动传递到果柄带动果实的振动,因此可以理解为果实和枝条的运动规律一致[26-28],本研究中,振动装置输入力的形式为简谐力,其枝条在简谐力的作用下做简谐运动,其运动方程为

$$\begin{cases}x_0=A_0\sin(wt)\\ y_0=0\end{cases} \tag{8}$$

式中 A_0——枝条振幅

w——枝条振动频率

将式(8)代入式(7)得

$$\ddot{\theta}-\frac{k+Mgl}{ml^2+Ml^2+I_c}\theta=\frac{MlA_0w^2}{ml^2+Ml^2+I_c}\sin(wt) \tag{9}$$

求解二阶常系数非齐次线性微分方程得

$$\theta=C_1\mathrm{e}^{\sqrt{\frac{k+Mgl}{ml^2+Ml^2+I_c}}t}+C_2\mathrm{e}^{-\sqrt{\frac{k+Mgl}{ml^2+Ml^2+I_c}}t}-\frac{MlA_0w^2}{(ml^2+Ml^2+I_c)\left(\frac{k+Mgl}{ml^2+Ml^2+I_c}+w^2\right)}\sin(wt) \tag{10}$$

式中 C_1、C_2——常数 t——振动时间

初始条件 $k=0$,$I_c=0$,当 $t=0$ 时,$\theta=0$,$\dot{\theta}=0$,求解得

$$\begin{cases}C_1=\dfrac{MlA_0w^3}{2(ml^2+Ml^2+I_c)\left(\dfrac{k+Mgl}{ml^2+Ml^2+I_c}+w^2\right)\sqrt{\dfrac{k+Mgl}{ml^2+Ml^2+I_c}}}\\ C_2=-\dfrac{MlA_0w^3}{2(ml^2+Ml^2+I_c)\left(\dfrac{k+Mgl}{ml^2+Ml^2+I_c}+w^2\right)\sqrt{\dfrac{k+Mgl}{ml^2+Ml^2+I_c}}}\end{cases}$$

2.3 果实脱落条件

冬枣果实受迫运动下受力如图 8 所示,受到果柄拉力 F_0、果实自身重力 G 和果实惯性力 F,其中 a 为惯性加速度,a_t 和 a_n 分别为切向和径向加速度,F_t 和 F_n 分别为切向和法向惯性力。

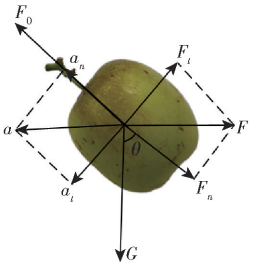


图 8　激振下冬枣果实受力分析

Fig. 8　Forces on winter jujube fruit under vibration

F_t和 F_n表达式为

$$F_n = Ma_n = Ml\dot{\theta}^2 \tag{11}$$

$$F_t = Ma_t = Ml\ddot{\theta} \tag{12}$$

联立式(10) ~ (12)求得

$$F_n = MlQ^2\left(\sqrt{\frac{k+Mgl}{ml^2+Ml^2+I_c}}\mathrm{e}^{\sqrt{\frac{k+Mgl}{ml^2+Ml^2+I_c}}t} - \sqrt{\frac{k+Mgl}{ml^2+Ml^2+I_c}}\mathrm{e}^{-\sqrt{\frac{k+Mgl}{ml^2+Ml^2+I_c}}t} + 2\sqrt{\frac{g}{l}}\cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}}t\right)\right)^2 \tag{13}$$

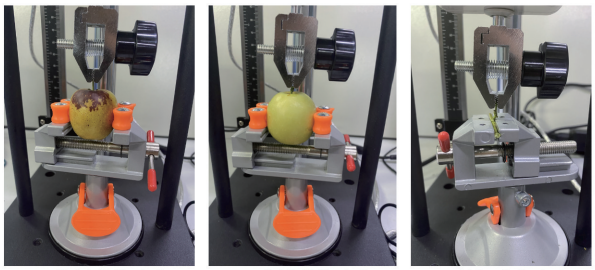
其中　$Q = \dfrac{MlA_0\left(\sqrt{\dfrac{g}{l}}\right)^3}{2(ml^2+Ml^2+I_c)\left(\dfrac{k+Mgl}{ml^2+Ml^2+I_c}+\dfrac{g}{l}\right)}$

如图 8 所示，冬枣果实脱落条件为 $F_n + G\cos\theta > F_0$，故冬枣脱落实际是由惯性力和重力分力共同作用。实际单颗冬枣质量较轻，重力较小，因此决定冬枣脱落主要因素为惯性力，当 $F_n > F_0$，果实脱落。通过式(13)可以看出，决定惯性力的因素有：冬枣质量 M、枝条质量 m、振动幅值 A_0、果柄与枝条接触点到果实质心的距离 l、果实转动惯量 I_c、振动时间 t、振动频率 w 和等效弹性系数 k。其中 M、l、m 为果实和枝条固有物理性质，I_c和 k 在同一时期枣果间差距不大，因此影响冬枣果实脱落的主要因素是振动幅值 A_0、频率 w 和振动时间 t。

3　结果与分析

3.1　青熟果脱落试验

根据 GB/T 22345—2008《鲜枣质量等级》，冬枣果实按成熟度可分为 3 类：未熟期、白熟期和脆熟期。脆熟果果体呈亮黄并出现一定深红的区域，此类果实糖度测量值大于 15 ~ 25，具有较好口感。白熟果介于脆熟果和未熟果之间，果体颜色由绿变深，但该果实糖度和口感还未达到成熟的标准。未熟果果体呈绿色，糖度低，口感差。将白熟果和未熟果统一归类为青果，将脆熟果定义为熟果。为验证受载状态下枣-果柄-枝条的脱落顺序，分别进行熟果-果柄、青果-果柄、熟果果柄-枝条和青果果柄-枝条脱落模拟试验(图 9)。



(a) 熟果脱落试验　(b) 青果脱落试验　(c) 果柄脱落试验

图 9　脱落试验

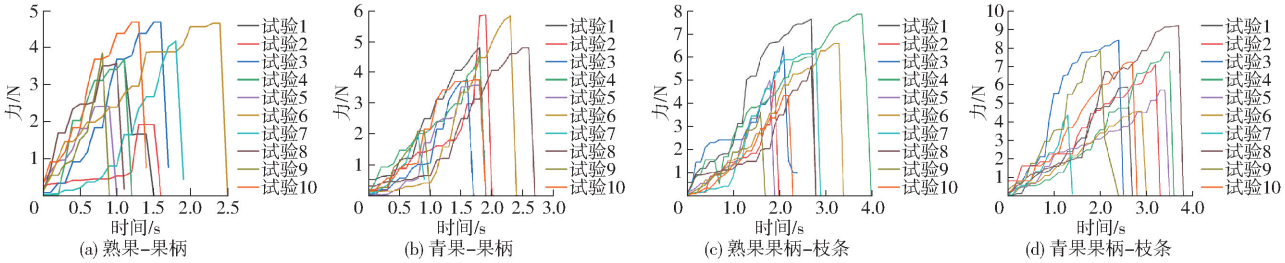
Fig. 9　Shedding test

为消除试验随机误差，每组试验重复 10 次，匀速转动装有数显推拉计的螺旋测试机架旋转手柄，给果柄施加匀速向上的载荷，试验结果如图 10 所示。随着受拉时间的增加，作用于果柄的拉力逐渐增大，当拉力等于脱落力时，果实脱落。图 10 显示了青果果柄和枝条断裂所需的拉力最大，脱落时间最长。

为更加直观地显示熟果、青果、果柄和枝条的脱落次序，从图 10 选取典型的脱落曲线，如图 11 所示，可以看出，在受载状况下，熟果最先脱落，其次是青果、熟果果柄和青果果柄。具体脱落所需的脱落力统计如表 1 所示，熟果所需脱落力最小，为 3.241 N，其次是青果(4.344 N)、熟果果柄(5.783 N)和青果果柄(6.823 N)。

3.2　田间振动试验

为探究抓摇式冬枣采收试验装置实现摘熟留青的最佳参数，2023 年 8 月 10 日在杨凌示范区冬枣园进行振动试验，如图 12 所示，试验主要仪器包括抓摇式冬枣采收试验装置和 EPE 泡沫板。根据第 2 节冬枣果实脱落动力学模型得出影响果实脱落的



(a) 熟果-果柄　(b) 青果-果柄　(c) 熟果果柄-枝条　(d) 青果果柄-枝条

图 10　脱落试验曲线

Fig. 10　Shedding test curves

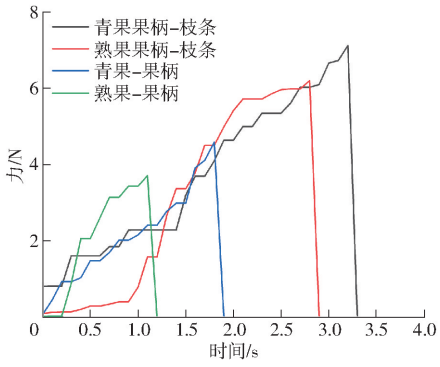


图 11 果实-果柄-枝条脱落次序

Fig. 11 Fruit - stalk - branch shedding order

表 1 冬枣脱落力统计结果

Tab. 1 Statistical results of winter jujube shedding force

N

类型	最大值	最小值	平均值	标准差
熟果-果柄	4.725	1.942	3.241	0.751
青果-果柄	5.853	2.012	4.344	1.374
熟果果柄-枝条	7.639	3.572	5.783	1.477
青果果柄-枝条	9.220	4.389	6.823	1.539

主要因素为振动频率、振动幅值和振动时间。选择这 3 个因素进行多因素试验,根据文献[19]获得的冬枣振动采收最佳工作参数(振幅17 mm,振动频率16 Hz,振动时间6 s)和采收装置可实现输出工作参数(振动频率:0 ~ 50 Hz,振动幅值:5 ~ 30 mm),确定如表 2 所示的试验因素编码。



图 12 冬枣振动试验

Fig. 12 Vibration test of winter jujube

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Experimental factor codes

编码	因素		
	振动频率/Hz	振动幅值/mm	振动时间/s
-1	10	10	2
0	15	20	4
1	20	30	6

3.2.1 评价指标

冬枣振动采收以实现冬枣摘熟留青为目标,果实脱落数量直接反映振动装置激振效果。以熟果脱落率 Y_1 和青果脱落率 Y_2 来评估摘熟留青效果。

3.2.2 多因素试验设计

采用 Design-Expert 8.0.6 设计多因素试验,如表 3 所示,采用熟果脱落率 Y_1 和青果脱落率 Y_2 作为评估指标。多因素试验共计 17 组,为减小试验结果误差,每组试验参数选择 3 棵冬枣树进行 3 次试验。分别统计青果脱落率和熟果脱落率,然后取平均值作为最终结果。

表 3 多因素试验设计与结果

Tab. 3 Multifactor experimental design and results

序号	因素			Y_1/%	Y_2/%
	振动频率/Hz	振动幅值/mm	振动时间/s		
1	15	20	4	74.17	12.73
2	20	30	4	75.26	13.22
3	10	20	6	70.24	12.32
4	20	20	2	70.68	13.14
5	15	20	4	72.91	14.08
6	20	20	6	72.76	14.25
7	20	10	4	66.11	10.21
8	15	20	4	74.22	14.89
9	15	10	2	70.71	12.72
10	15	30	6	76.22	15.57
11	15	10	6	70.36	13.21
12	15	20	4	72.38	13.33
13	10	10	4	64.23	8.67
14	15	20	4	71.33	13.01
15	10	30	4	69.57	12.33
16	10	20	2	65.32	9.95
17	15	30	2	70.77	12.98

3.2.3 回归模型建立与显著性检验

建立振动频率、振动幅值和振动时间对青熟果脱落率的多元回归模型,并对回归模型进行残差分析和显著性检测。通过试验分析,得到 3 种不同采收参数与熟果脱落率 Y_1 之间的回归方程为

$$Y_1 = 73.00 + 1.93X_1 + 2.55X_2 + 1.51X_3 + 0.95X_1X_2 - 0.71X_1X_3 + 1.45X_2X_3 - 3.24X_1^2 - 0.97X_2^2 - 0.02X_3^2 \quad (14)$$

式中 X_1——振动频率编码值

X_2——振动幅值编码值

X_3——振动时间编码值

建立 3 种采收参数与青果脱落率 Y_2 之间的回归方程

$$Y_2 = 13.61 + 0.94X_1 + 1.16X_2 + 0.82X_3 - 0.16X_1X_2 - 0.32X_1X_3 + 0.52X_2X_3 - 1.85X_1^2 - 0.65X_2^2 + 0.66X_3^2 \quad (15)$$

对冬枣果实脱落率模型进行残差分析,如图 13 所示,熟果和青果脱落率的残差沿着直线呈线性分布,具有较好的拟合程度,因此基于本试验获取的冬

枣果脱落率数据建立的模型可靠性较高。

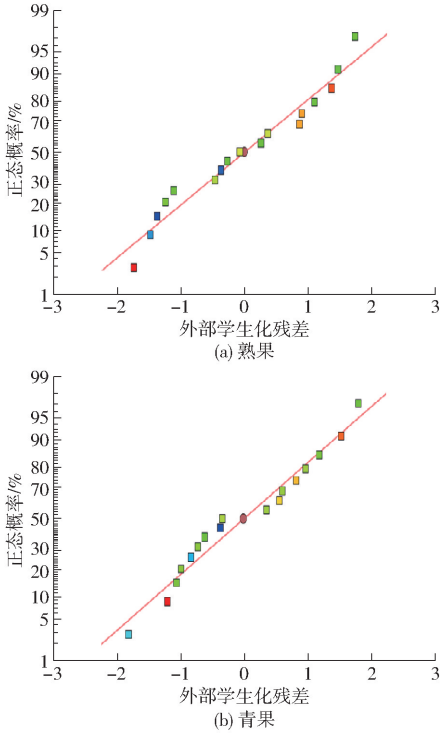


图 13　冬枣脱落率残差分布图

Fig. 13　Residual distribution of winter jujube shedding rate

通过方差分析得出各试验因素及交互作用对熟果脱落率的显著性检验结果如表 4 所示，模型极显著（$P<0.01$），振动频率、振动幅值和振动频率的二次项对冬枣熟果脱落率的影响极显著，振动时间对熟果脱落率的影响显著。失拟项 $P>0.05$，说明没有不相关的因素，表明该回归模型可靠。

表 4　熟果脱落率 Y_1 方差分析

Tab. 4　Analysis of variance of ripe fruit shedding rate Y_1

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	164. 17	9	18. 24	8. 14	0. 005 7
X_1	29. 84	1	29. 84	13. 32	0. 008 2
X_2	52. 07	1	52. 07	23. 24	0. 001 9
X_3	18. 30	1	18. 30	8. 17	0. 024 4
X_1X_2	3. 63	1	3. 63	1. 62	0. 243 8
X_1X_3	2. 02	1	2. 02	0. 90	0. 374 4
X_2X_3	8. 41	1	8. 41	3. 75	0. 093 9
X_1^2	44. 13	1	44. 13	19. 70	0. 003 0
X_2^2	3. 98	1	3. 98	1. 78	0. 224 3
X_3^2	9.161×10^{-4}	1	9.161×10^{-4}	4.089×10^{-4}	0. 984 4
残差	15. 68	7	2. 24		
失拟项	9. 64	3	3. 21	2. 13	0. 239 2
纯误差	6. 04	4	1. 51		
总和	179. 85	16			

通过方差分析得出各试验因素及交互作用对青果脱落率的显著性检验结果如表 5 所示，模型显著（$P<0.05$），振动频率和振动时间显著，振动频率的二次项和振动幅值极显著。失拟项 $P>0.05$，说明没有不相关的因素，表明该回归模型可靠。

表 5　青果脱落率 Y_2 方差分析

Tab. 5　Analysis of variance of green fruit shedding rate Y_2

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	42. 84	9	4. 76	5. 51	0. 017 4
X_1	7. 13	1	7. 13	8. 25	0. 023 9
X_2	10. 79	1	10. 79	12. 49	0. 009 5
X_3	5. 38	1	5. 38	6. 23	0. 041 3
X_1X_2	0. 11	1	0. 11	0. 12	0. 736 9
X_1X_3	0. 40	1	0. 40	0. 46	0. 519 6
X_2X_3	1. 10	1	1. 10	1. 28	0. 295 8
X_1^2	14. 45	1	14. 45	16. 73	0. 004 6
X_2^2	1. 77	1	1. 77	2. 05	0. 195 8
X_3^2	1. 83	1	1. 83	2. 12	0. 188 6
残差	6. 05	7	0. 86		
失拟项	2. 97	3	0. 99	1. 29	0. 392 0
纯误差	3. 07	4	0. 77		
总和	48. 89	16			

3. 2. 4　最优收获参数确定

为实现冬枣摘熟留青，分批收获，应在获得最大熟果脱落率的同时尽可能降低青果脱落率。因此，在 Design-Expert 软件中的 Optimization 模块以熟果最大脱落率和青果最小脱落率为目标，对冬枣采收的参数进行优化求解，优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases}\max Y_1(X_1,X_2,X_3)\\ \min Y_2(X_1,X_2,X_3)\\ \text{s.t.}\begin{cases}-1\leqslant X_1\leqslant 1\\ -1\leqslant X_2\leqslant 1\\ -1\leqslant X_3\leqslant 1\end{cases}\end{cases}\tag{16}$$

获得最优采收参数：振动频率为 12. 66 Hz、振动幅值为 15. 02 mm、振动时间为 3. 98 s，此时，熟果脱落率为 70. 08%，青果脱落率为 11. 97%。

为验证最优参数采收效果，调节振动频率为 12. 7 Hz，振动振幅为 15. 0 mm，振动时间为 4. 0 s，在此参数组合下选取 10 棵冬枣树进行抓摇振动试验，采收前后枣树如图 14a、14b 所示，对图 14c 所示的



(a) 采收前　(b) 采收后　(c) 振落果实

图 14　最优参数田间试验

Fig. 14　Field test using optimal parameters

振落枣进行统计求取熟果脱落率和青果脱落率,对10 棵枣树试验结果求平均值消除随机误差,最终采用该最优参数组合得到的熟果脱落率为 72.81%,青果脱落率为 12.78%,与优化的试验结果基本一致,证明了该参数组合的可靠性。

4 结论

(1)根据设施枣园枣树种植模式和枣树树形特点,设计了一款可调节振动高度、振动频率和振动幅值,具有信息感知功能的冬枣采收试验装置,该装置可实现枣树最佳位点的识别、自主导航、自动抓摇收获等功能。

(2)利用拉格朗日函数,建立了受迫振动下果实单摆动力学模型,通过对动力学模型的求解,得到了影响果实脱落的 3 个重要因素:振动频率、振动幅值和振动时间。

(3)采用显示推拉计进行了青熟果果实-果柄、果柄-枝条的脱落模拟试验,确定了熟果、青果、果柄的脱落次序,证明了冬枣摘熟留青的可行性。

(4)建立以熟果脱落率、青果脱落率为响应指标的二次多项式响应回归模型,通过对各指标回归模型进行多目标优化获得了摘熟留青最优参数组合:振动频率为 12.66 Hz、振动幅值为 15.02 mm、振动时间为 3.98 s。在该参数组合下熟果脱落率为 70.08%,青果脱落率为 11.97%,对优化结果进行了田间试验验证,试验结果为:熟果脱落率 72.81%,青果脱落率 12.78%,与优化值相近,证明了回归模型的可靠性。

参 考 文 献

[1] 周淑荣, 董昕瑜, 郭文场, 等. 冬枣的营养及品种简介[J]. 特种经济动植物,2019,22(2): 45 -48.
ZHOU Shurong,DONG Xinyu, GUO Wenchang, et al. Introduction to the nutrition and varieties of winter jujube[J]. Special Economic Plants and Animals, 2019,22(2): 45 -48. (in Chinese)

[2] HU Y, ZHENG Z, YU C, et al. Vibration response characteristics of jujube trees based on finite element method and structure-from-motion[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 331: 113125.

[3] ZHENG Z, HU Y, YANG H, et al. AFFU - Net: attention feature fusion U - Net with hybrid loss for winter jujube crack detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107049.

[4] ZHENG Z,HU Y,GUO T, et al. AGHRNet: an attention ghost - HRNet for confirmation of catch-and-shake locations in jujube fruits vibration harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 210: 107921.

[5] PENG J, XIE H, FENG Y, et al. Simulation study of vibratory harvesting of Chinese winter jujube (*Zizyphusjujuba* Mill. cv. Dongzao[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143: 57 -65.

[6] 徐慧群, 李阳,张建军. 冬枣果实特性及机械化采摘现状研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(2): 53 -59.
XU Huiqun, LI Yang, ZHANG Jianjun. Study on the characteristics of winter jujube fruit and the status of mechanized harvesting[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(2): 53 -59. (in Chinese)

[7] 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.

[8] 刘洪杰, 李峻藤, 杨欣, 等. 手持摇枝式酸枣振动采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 194 -204, 215.
LIU Hongjie, LI Junteng, YANG Xin, et al. Design and experiment of hand-held shaking-branch vibration picking device for sour jujube[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(9): 194 -204, 215. (in Chinese)

[9] 宗望远, 宋宝, 肖洋轶, 等. 曳引摇枝式板栗落果装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 57 -65.
ZONG Wangyuan, SONG Bao, XIAO Yangyi, et al. Design and experiment of traction-shaking chestnut fruit-dropping device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 57 -65. (in Chinese)

[10] ZHOU P, LI Y, WANG B, et al. Analysis and experimental study on vibration response characteristics of mechanical harvesting of jujube[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 203: 107446.

[11] 闫德, 汪建晓, 罗陆锋, 等. 断梗激励下葡萄果粒的振动脱落特性与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 31 -40.
YAN De, WANG Jianxiao, LUO Lufeng, et al. Vibration shedding characteristics and experiment of grape berries under stem breaking excitation[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(22):31 -40. (in Chinese)

[12] 韩元顺, 许林云, 周杰, 等. 基于高速摄影的板栗果实振动脱落特性分析[J]. 林业工程学报, 2021, 6(3): 133 -141.
HAN Yuanshun, XU Linyun, ZHOU Jie, et al. Analysis of chestnut fruit vibration shedding characteristics based on high-speed photography[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(3): 133 -141. (in Chinese)

[13] 何荣. 自走式矮化密植红枣收获机激振装置的设计及试验研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2014.
HE Rong. Design and experimental study of the vibration device of self-propelled dwarf densely planted red dates harvester [D]. Shihezi: Shihezi University, 2014. (in Chinese)

[14] 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 and experiment of vibration parameters of oil-tea canopy based on

double pendulum model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 96 – 104. (in Chinese)

[15] 谯懿宸. 红枣振动采收方法研究及装置研制[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2023.
QIAO Yichen. Research on vibration harvesting method and device development of red dates[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. (in Chinese)

[16] 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 Zhian, XU Liming, et al. Simulation and experimental study on the vibration shedding characteristics of wolfberry fruit[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 120 – 128. (in Chinese)

[17] 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. Research on key technologies of wolfberry harvesting by vibration brushing[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[18] 彭俊, VAZQUEZ M, 孙世鹏, 等. 冬枣果实物理参数与生物特性研究[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(8): 95 – 100.
PENG Jun, VAZQUEZ M, SUN Shipeng, et al. Study on physical parameters and biological characteristics of winter jujube fruit[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(8): 95 – 100. (in Chinese)

[19] 李忠杰. 摇枝式冬枣振动采收参数的试验研究[D]. 阿拉尔：塔里木大学, 2021.
LI Zhongjie. Experimental study on vibration harvesting parameters of winter jujube[D]. Aral: Tarim University, 2021. (in Chinese)

[20] 彭俊. 冬枣振动收获机理研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2017.
PENG Jun. Study on the mechanism of vibration harvesting of winter jujube[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)

[21] 傅隆生, 刘智豪, 冯亚利, 等. 基于高速摄影的冬枣果实振动脱落规律分析[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(8): 135 – 141.
FU Longsheng, LIU Zhihao, FENG Yali, et al. Analysis of vibration shedding law of winter jujube fruit based on high-speed photography[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(8): 135 – 141. (in Chinese)

[22] 靳文停, 赵金辉, 庄腾飞, 等. 林果机械振动采摘理论与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 144 – 160.
JIN Wenting, ZHAO Jinhui, ZHUANG Tengfei, et al. Research progress on theory and equipment of vibration harvesting of fruit and vegetable machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 144 – 160. (in Chinese)

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

[24] 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)

[25] 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 experiment of single eccentric olive vibration harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 114 – 123. (in Chinese)

[26] 丁凯, 张炳成, 张慧明, 等. 机械振动式红枣收获的动力学研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(2): 50 – 54.
DING Kai, ZHANG Bingcheng, ZHANG Huiming, et al. Dynamics of mechanical vibration harvesting of red dates[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(2):50 – 54. (in Chinese)

[27] 马少辉, 曹琦, 杨蕊, 等. 矮化密植红枣振动式采收机作业参数优化与试验[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2024, 55(1): 84 – 92.
MA Shaohui, CAO Qi, YANG Rui, et al. Optimization and experiment of operating parameters of vibration harvester for dwarf densely planted jujube[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2024, 55(1): 84 – 92. (in Chinese)

[28] 杨凯. 振动式红枣采收机设计与试验[D]. 阿拉尔：塔里木大学, 2023.
YANG Kai. Design and experiment of vibrating red date harvester[D]. Aral: Tarim University, 2023. (in Chinese)