doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.11.024

基于 TRIZ 理论的半径可调式林果振动采收激振器设计与试验

焦灏博[1]　罗炬明[1]　汤爱沸[1]　马　晨[1]　王丽红[1,2]　李亚萍[3]　李成松[1,2]

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 丘陵山区农业装备重点实验室, 重庆 400715;
3. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003)

摘要: 针对现有激振器输出的激振力幅值和频率无法独立可调,造成激振力的幅值和频率无法同时满足林果振动采收需求的问题,利用 TRIZ 理论构建出激振器与果树物质-场模型。根据物质-场模型和物理冲突解决问题的方法,获得偏心块式激振器激振力振幅和频率独立可调的偏心块布局,提出了四偏心块激振器和半径可调式激振器方案。并通过 2 种激振器设计方案的动态性能对比发现,半径可调式激振器性能更优。以柑橘树为试验对象,利用半径可调式激振器对不同的果树施加 3 种不同频率和振幅的激振力。结果表明增大激振力频率,果实采净率呈增大趋势。同时激振频率一定时,增大激振力幅值,果实采净率也呈增大趋势,当激振频率为 19 Hz、丝杠螺母行程为 70 mm 时,果实平均采净率为 86.3%。通过试验对比发现,激振频率对果实采净率影响程度大于激振力幅值的影响程度。半径可调式激振器能够改变激振力幅值,提高果实采净率。同时半径可调式激振器具有幅频独立调节特性,当激振力频率较大时,降低振幅以够防止果树损伤。

关键词: 激振力; 林果采收; 幅频调节; TRIZ 理论; 半径可调式激振器

中图分类号: S225.93　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2024)11-0231-09　　**OSID**:

Design and Test of Radius Adjustable Fruit Vibration Harvesting Exciter Based on TRIZ Theory

JIAO Haobo[1]　LUO Juming[1]　TANG Aifei[1]　MA Chen[1]　WANG Lihong[1,2]　LI Yaping[3]　LI Chengsong[1,2]

(1. *College of Engineering and Technology*, *Southwest University*, *Chongqing* 400715, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Hilly and Mountainous Areas*, *Chongqing* 400715, *China*
3. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832003, *China*)

Abstract: In order to solve the problem that the magnitude and frequency of excitation force output by existing exciter cannot be adjusted independently, the amplitude and frequency of excitation force cannot meet the demand of fruit vibration harvesting at the same time, TRIZ theory was used to construct the model of exciter and fruit tree matter - field. According to the matter - field model and the physical conflict solving method, the eccentric block layout of the excitation force amplitude and frequency of the eccentric block exciter was obtained, and the schemes of the four eccentric block exciter and the radius adjustable exciter were proposed. By comparing the dynamic performance of the two designs, it was found that the moment of inertia of the radius adjustable exciter was lower than that of the four eccentric blocks. The smaller the moment of inertia of the shaker was, the smaller the torque and power required during the rotation of the shaker was. When the four eccentric blocks were rotating, the phase angle size of each eccentric block was changed with time, so it was very difficult to adjust the size of the phase angle φ. In the radius adjustable exciter, the eccentric block and the rotating axis were relatively fixed in the radial direction, and the eccentric block radius was relatively static in the axial direction, and it was relatively easy to adjust the eccentric block radius in the axial direction. Therefore, the radius adjustable exciter was more suitable for the amplitude-frequency regulation mechanism of exciting force in the process of

收稿日期: 2024-01-04　修回日期: 2024-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52265036)和新疆重点研发计划项目(2022B02028-3)

作者简介: 焦灏博(1992—),男,博士生,主要从事农业机械装备及关键技术研究,E-mail: jiaohaobo@126.com

通信作者: 李成松(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事林果相关机械技术与装备研究,E-mail: lcs_shz@163.com

fruit vibration harvesting. Three different frequencies and amplitudes were applied to citrus trees. Citrus trees were used as test subjects to apply three different frequencies and amplitudes of excitation forces to different fruit trees with adjustable radius exciter. The results showed that the detachment rate of fruit was increased with the increase of the frequency of excitation force. At the same time, when the exciting frequency was constant, the amplitude of the exciting force was increased, and the detachment rate of the fruit also showed an increasing trend. When the exciting frequency was 19 Hz and the stroke of the screw nut was 70 mm, the average detachment rate of the fruit was 86.3%. The results showed that the effect of excitation frequency on the detachment rate was greater than that of excitation force amplitude. The radius adjustable exciter can change the amplitude of the exciting force and improve the fruit harvest rate. At the same time, the amplitude-frequency independent regulation characteristic of the radius adjustable exciter can reduce the amplitude to prevent the damage of fruit trees when the excitation force frequency was large.

Key words: exciting force; fruit harvesting; amplitude-frequency regulation; TRIZ theory; adjustable radius exciter

0 引言

中国土地辽阔,拥有寒、温、热 3 个气候带,果树种类丰富,水果和坚果品种众多,种植面积广泛[1]。据国家统计局 2021 年统计结果,林果种植面积超过 1.227×10^7 hm^2,坚果和水果总产量高达 2.7×10^8 t[2],已经成为世界上最大林果产地[3]。

随着林果采收机械化发展,树干振动采收技术较为广泛应用于坚果和工业加工类的水果采收[4-6]。为了提高振动式林果收获机械作业效率,国内外学者开展了大量研究。在毛核桃振动收获方面,杜小强等[7-8]针对毛核桃收获提出了正交激振器,输出三维激振力,并利用锤击法获得毛核桃树模态频率,实现了毛核桃收获。在橘子振动收获方面,文献[9-11]提出一种选择性收获方法,并比较未成熟橘子和成熟橘子的振动采收,结果表明,未成熟橘子需要更高的振幅和频率,通过调节振动频率,实现选择性收获。在咖啡豆的振动收获中,建立咖啡树的空间模型进行仿真,并利用电子传感器检测咖啡树树干和树枝的振动特性,为咖啡树振动收获提供了参考[12]。同时在林果振动采收过程中,振动能量传递规律被大多学者关注和研究,发现振动频率越高,能量传递效率越高[13-14]。然而以离心力为作为激振力时,频率越高,激振力越大,过大的激振力会造成果树损伤。在激振频率增大时,激振力幅值应该独立可调,以避免激振力幅值远远超过果实掉落需要的激振力幅值,这是现有以离心力为激振力的激振器无法实现的。

除此之外,学者们也对果树动态特性进行了研究[15-18]。利用不同的振动形态和振动频率对果树振动采收响应规律进行研究,并对果实脱落的动力学进行有限元仿真和田间试验,发现直线往复式振动更有利于果实脱落[19-20]。

根据上述研究结果,对现有的往复直线式激振力对应的对称激振器进行改进研究,通过改进对称双偏心块式激振器结构,使其实现激振力幅值和频率单独调节。

TRIZ 理论能够通过现有的研究创造出新的科学成果,推动科技发展[21-23]。TRIZ 理论在农业装备开发中的应用越来越广泛,例如在红花丝采收、排种器的设计、钵苗的移栽等关键技术的开发均采用了 TRIZ 理论[24-28]。为了促进林果振动收获技术发展,本文引入 TRIZ 理论对对称双偏心块式激振器的激振力幅值和激振频率调节机理进行研究。利用 TRIZ 理论构建现有的激振器、果树和果实的物质-场模型,并对现有激振器机理的有利作用和有害作用进行分析。利用 TRIZ 理论的物质-场和物理冲突的解决方案,设计出半径可调式激振器,并对半径可调式激振器的变频变幅性能进行测试。

1 材料与方法

1.1 常见收获激振器工作机理

目前,常见的振摇式林果收获激振器采用离心力驱动。通过改变激振器偏心块结构和质量块布置形式,产生不同的激振力。根据其激振器布局,激振器分为对称双偏心激振器、单偏心激振器、非对称双偏心激振器,图 1 展示了 3 种激振器结构原理图及其力学模型。图中 m、m_1、m_2为偏心块质量,kg;e 为偏心距,m;ω、ω_1、ω_2为偏心块旋转角速度,rad/s;$me\omega^2$为偏心块离心力,N。单偏心激振器(图 1a)产生的离心力方向随时间改变,当转速一定时,激振力幅值不变,产生扭转振动。对称双偏心激振器(图 1b)产生的离心力方向固定,大小随时间直线往复变化。非对称双偏心激振器(图 1c)激振力方向与偏心块质量和转速相关。当偏心块转速、质量、偏心距不变时,激振力幅值和方向随时间呈周期性变

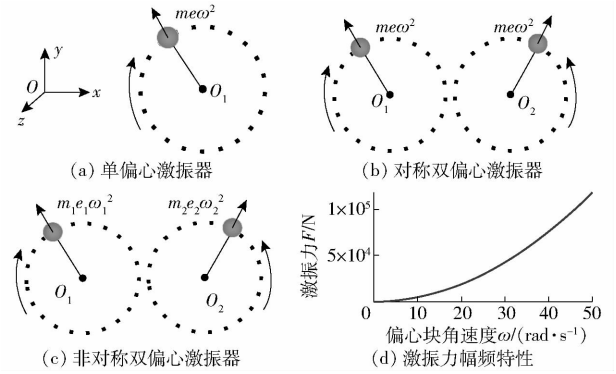

图 1　3 种常见惯性振动收获机结构原理图及力学模型

Fig. 1　Schematics and physical models of three types of common inertial vibratory harvesters

化，对果树产生扭转和直线往复 2 种运动的叠加[8]。上述现有的激振器中每个偏心块幅频特性满足

$$F = me\omega^2 \tag{1}$$

式中　F——激振力

激振力频率和激振力幅值为固定的平方关系，如图 1d 所示。激振器频率一定，激振力幅值不变，这导致对任意一棵果树，激振器的激振力频率和幅值 2 个参数不可能同时满足振动采收要求。然而对称双偏心激振器产生的直线往复正弦激振力有利于振动能量的传递[17]。因此以对称双偏心激振器作为参照，研究激振力频率和大小可调的激振器机理。

1.2　激振器与果树物质-场模型

为进一步分析现有对称双偏心激振器和果树在振动过程中的有利因素和有害因素，采用 TRIZ 理论构建激振器-果树-果实的物质-场模型，如图 2 所示。图中 S1 为激振器，S2 为果树，f 为果柄对果实的连接力，S3 为果实。假设激振力频率、激振力幅值能够使一棵果树的果实采净率达到要求，即激振器与果树、果实正常作用的物质-场模型如图 2a 所示。

当果树振动频率对应的激振力幅值迫使果实产生的惯性力小于果实掉落实际需要的激振力时，出现激振器与果树、果实作用不充分，其物质-场模型如图 2b 所示。

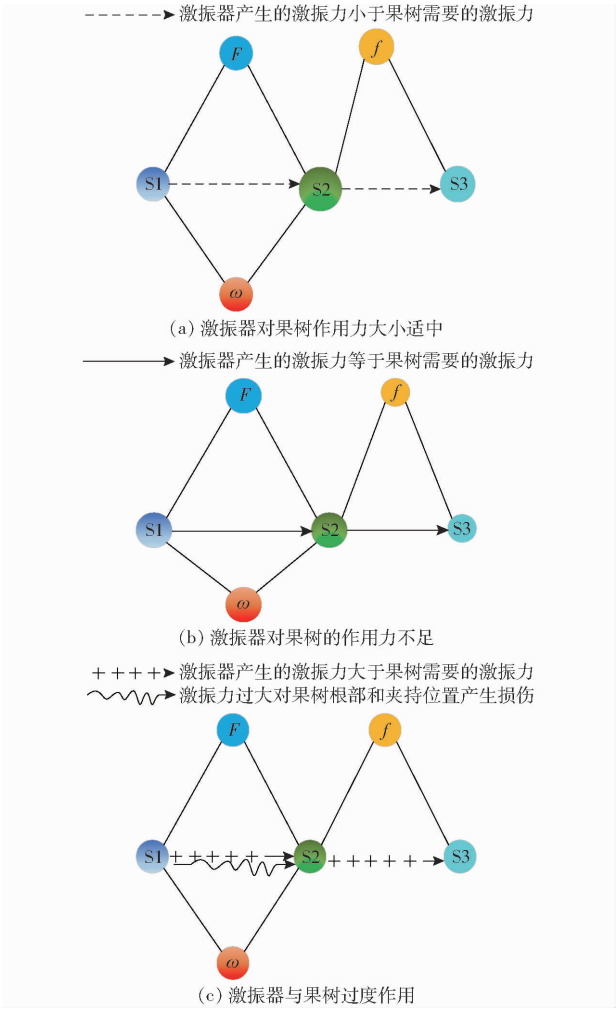

图 2　激振器与果树物质-场模型

Fig. 2　Shaker and fruit tree matter - field model

当果树振动频率对应的激振力过大，超过了实际需要的激振力幅值时，出现激振器与果树的过度作用，同时激振力过大导致果树根部和夹持位置损伤，出现对果树的有害作用，其物质-场模型如图 2c 所示。

为实现激振器的激振力幅值和频率独立可调，根据物质-场模型解决问题的方法，对现有的物质-场模型引入一种物质或一种场，获得激振器-果树-果实振动采收的新物质-场模型如图 3 所示。

当对激振器物质-场模型引入物质 S4 时（图 3a），引入这种物质可视为偏心块的质量减少

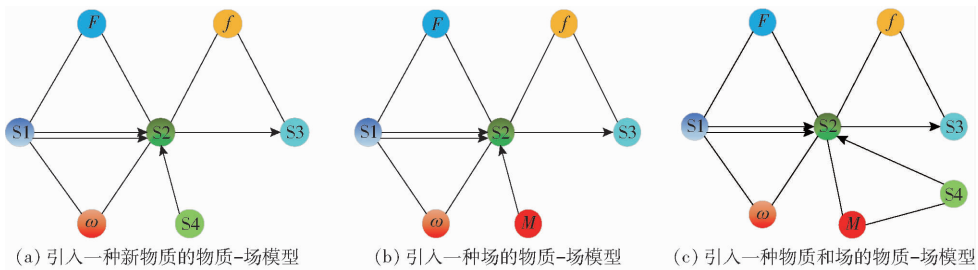

图 3　振幅频率可调的激振器果树物质-场模型

Fig. 3　Exciter and fruit tree matter - field model with adjustable amplitude and frequency

或增大,即调节每个偏心块的质量,实现对激振器激振力振幅的调节。当激振力振幅过大时,可减少偏心块的质量,实现对激振力振幅的降低;当激振力振幅过小时,可通过增加质量,增大激振力的振幅。

对激振器-果实物质-场模型中添加一种激振力场 M,如图 3b 所示,即振动不充分时,添加一个同向激振力场,弥补振动不足。激振力过大时,添加一个反向的激振力场抵消过度振动的激振力,实现激振器振幅和频率适应果树的振动需求。

同时引入一种物质和一种场,如图 3c 所示,可视为增加偏心块数量,当原来的激振器激振力幅值不充足时,添加的偏心块能产生相同方向的激振力,对其激振力幅值进行补充。当激振力幅值过大时,添加的偏心块能产生相反的激振力,对其进行抵消,实现激振力幅值、频率的单独调节。

综上 3 种改进的物质-场模型,对现有偏心式激振器增加偏心块的数量,当偏心块旋转过程中,产生激振力与原来的偏心块产生激振力的矢量求和,通过新添加的偏心块初始相位角调节,使激振器输出频率和振幅独立调节。

1.3 激振力幅频物理冲突

林果振动采收中的激振力幅频物理冲突如图 4 所示,当果树需要较大的激振频率时,果树才能产生强烈的振动,能够提高能量传递效率和果实采净率。然而激振频率增大,同时激振力幅值增大,过大的激振力,对果树夹持位置、果树根部将会产生损伤,同时过大的激振力也需要更大的驱动力矩和能量。因此激振频率将成为一个影响激振器适应林果振动采收需求的物理参数。激振力在偏心块旋转过程中产生,应该通过激振器中的偏心块结构方面改进,以解决林果振动采收中激振力幅频的物理冲突。

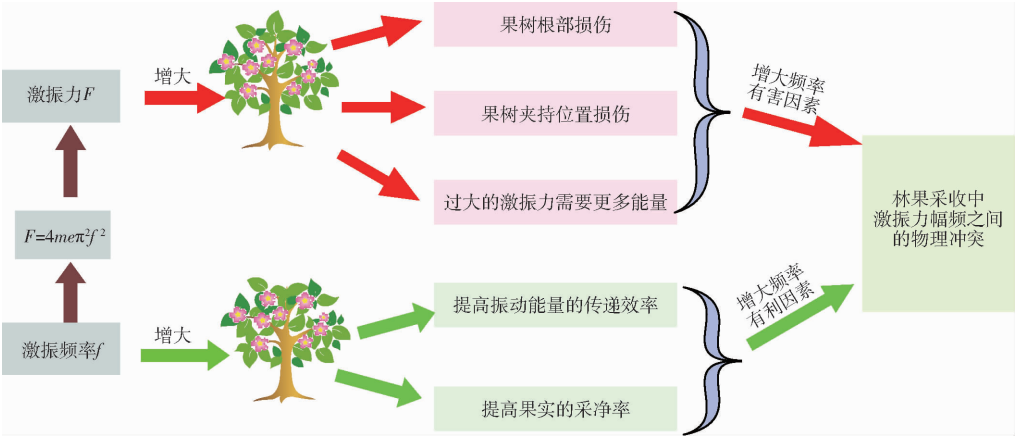

图 4 林果收获中激振力幅值与频率物理冲突

Fig. 4 Physical conflict between amplitude and frequency of excitation force in fruit harvesting

根据 TRIZ 理论中解决物理冲突的方法主要有 5 种,分别为基于时间的分离原理、基于空间的分离原理、基于关系的分离原理、基于方向的分离原理和基于系统级别分离原理。离心力产生过程中,激振力幅值和频率关系如图 5 所示,由于激振器激振力幅值和频率的改变同时发生,同时满足离心力计算公式(1),因此基于时间的分离不可行。

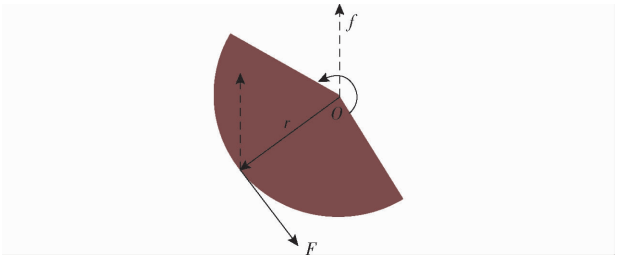

图 5 激振力幅值与频率的关系

Fig. 5 Relation between amplitude and frequency of excitation force

激振力幅值和频率处于同一个偏心块上,属于最小系统单元,不可再次进行系统分解,因此基于系统级别的分离原理不可行。激振力幅值方向和激振力频率方向处于异面且相互垂直,这种关系不可以人为改变,因此基于方向的分离同样不可行。

选择基于空间或者关系的分离原理解决上述冲突。其对应的解决方案包括:局部质量、空间维数的变化、周期性作用、多孔材料、改变颜色、复合材料、分割、抽取、嵌套、非对称等方法。由于激振力幅值由质量、偏心距、频率决定,因此只能通过偏心块的半径解决上述物理冲突。半径是一个长度参数,属于几何参数。因此空间维数的变化成为一个较好的解决方案。改变偏心块维度,可增大偏心块运动自由度。将偏心块偏心距设计为可调式的空间结构。当激振频率增大时,减少偏心距实现激振力幅值降低。

通过利用 TRIZ 理论中物质-场模型和物理冲突对激振力幅值独立调节提出了 2 种方案。增加一

组偏心块，利用离心力的矢量进行合成，降低激振力的幅值；或者通过改变离心力的半径实现激振力幅值的降低。

1.4　激振力幅值调节方案性能对比

1.4.1　双对称偏心式激振器幅值变化规律

在对称双激振器的基础上添加一对相同偏心块，构成双对称激振器，原理如图 6a 所示，可视为 1 个偏心块被分割成 2 个角速度相同的偏心块。$m=e=\omega=1$，相位角 φ 一定时，激振力轨迹为一条直线。

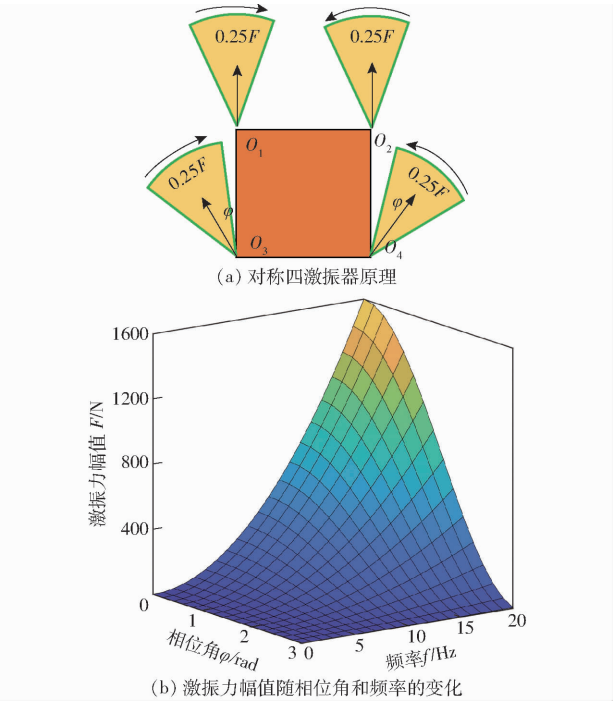

图 6　对称双激振器激振力特性

Fig. 6　Force characteristics of symmetrical double eccentric block exciters

如图 6b 所示，随着相位角 φ 变化范围为 0° ~ 180°，激振力呈现出逐渐变小趋势。因此，激振力幅值受相位角和频率 2 个因素影响。不管频率怎样变化，都可以通过调节相位角改变激振力。激振力幅值计算公式和偏心块转动惯量计算式为

$$F=2me\omega^2\sin(\omega t)+2me\omega^2\cos\varphi\sin(\omega t) \tag{2}$$

$$J=4J_e+4me^2 \tag{3}$$

式中　J_e——偏心块质心转动惯量

J——偏心块到旋转轴转动惯量

对称双激振器增加参数相同的偏心块，能够实现利用偏心块的相位角调节实现激振力幅值。特别的，当相位角 φ 为 0° ~ 180°，在频率不变的条件下，激振力幅值从 $me\omega^2$ 到 0 变化。

1.4.2　半径可调式激振器

半径可调式激振器的原理如图 7a 所示，偏心块和旋转轴采用平行四杆机构连接。平行四杆机构与

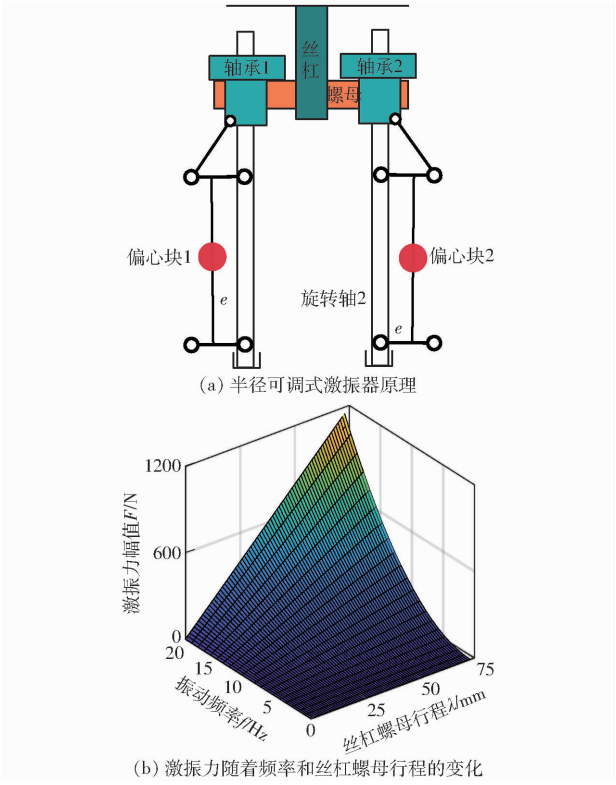

图 7　半径可调式激振器激振力性能

Fig. 7　Excitation force performance of radius adjustable shaker

滑块摇杆机构串联，滑块摇杆机构通过滚珠丝杠驱动，实现偏心块偏心距的调节。当丝杠旋转使螺母向上移动，带动 2 个轴承向上移动，偏心距 e 变小，可实现激振力幅值调节。其激振力幅值和转动惯量计算式为

$$F=2me(\lambda)\omega\sin(\omega t) \tag{4}$$

$$J=2me^2(\lambda)+2J_e \tag{5}$$

式中　λ——滚珠丝杠螺母行程，mm

激振力幅值随丝杠螺母行程变化如图 7b 所示，当丝杠螺母行程增大时，偏心距 e 增大，激振力幅值变大。当滚珠丝杠的半径不变时，激振力幅值随着频率变化关系与离心力的幅频关系一致，即成平方关系。

2 种激振器均能实现激振力幅值和频率的调节，然而对比 2 种激振器的转动惯量发现，半径可调式激振器的转动惯量低于四偏心块激振器的转动惯量。同时，激振器的转动惯量越小，激振器转动过程中所需要的力矩和功率将会越小。同时当四偏心块激振器在转动过程每个偏心块的相位角随着时间在改变，因此，调节相位角 φ 非常困难。在半径可调式激振器中，偏心块和旋转轴在径向相对静止，在轴向调节偏心块的偏心距 e 比较容易。因此半径可调式激振器更适合作为林果振动收获过程中激振力幅频调节方式。

1.5 半径可调式激振器三维模型

半径可调式激振器的三维结构如图 8 所示。利用 4 个摆杆将偏心块和转动轴以旋转副连接,实现偏心块沿着旋转轴的轴向平移,使偏心块具有旋转和沿着轴向平移 2 个自由度,如图 8a 所示。另一组连杆将偏心块和圆柱关节连接,圆柱关节相对滚珠丝杠固定,当螺母移动时,带动偏心块沿着轴向移动,这样实现激振力幅值和频率的同步调节,如图 8b 所示。同时与普通的偏心块相比,现有偏心块的截面类似于凹槽状,形状发生改变,总体呈现出长槽类结构。

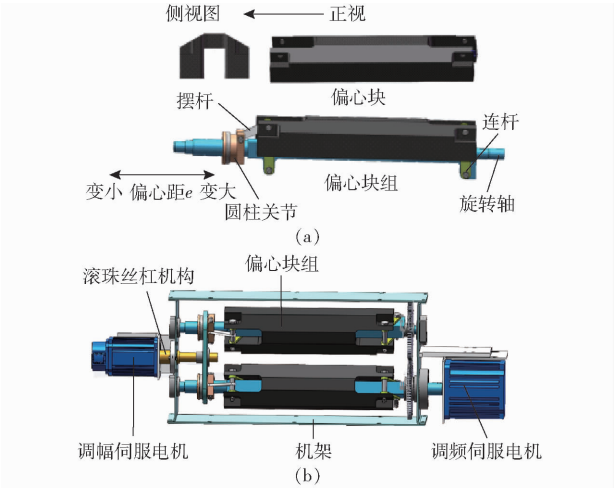

图 8 半径可调式激振器结构图

Fig. 8 Adjustable radius exciter

2 半径可调式激振器性能试验

2.1 试验方案

试验于 2023 年 11 月 20 日在重庆市北碚区柑橘研究院种植基地进行,试验树种为柑橘树。由于果树大小和果实的采收季节对采收效果影响较大,本文选择 3 棵树形差异性不大的果树进行试验。果园的种植模式以及柑橘树的主要特征参数见表 1。

表 1 试验果树的主要参数

Tab. 1 Main parameters of fruit trees

参数	数值
柑橘树行间距/m	5.6
柑橘树株间距/m	4.8
60 cm 高处树干直径/cm	11.2 ~ 14.8
果树高度/m	3.6 ~ 4.2
树冠半径/m	2.2 ~ 2.6

半径可调式激振器样机驱动系统如图 9a 所示,利用 2 个伺服电机分别实现半径可调式激振器激振力频率、幅值调节。伺服电机通过伺服控制器与上位机连接,利用 RS232 协议实现上位机与伺服控制器通信。调幅伺服电机利用位置模式控制激振力幅

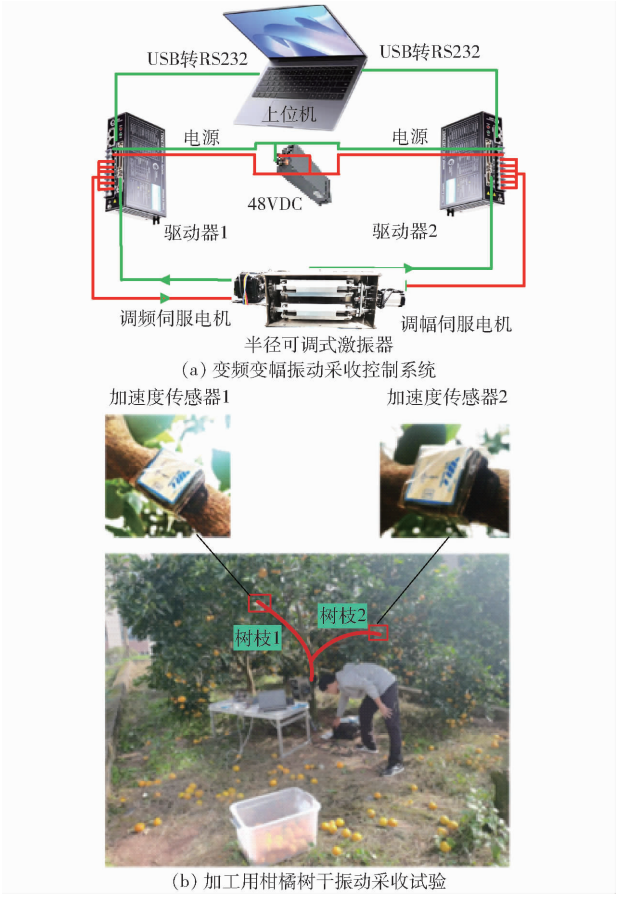

图 9 开心形柑橘树振动测试方案

Fig. 9 Open-heart vibration test scheme

值,调频伺服电机利用速度模式控制激振器频率,实现激振力频率和振幅调控。调频伺服电机功率为 1.5 kW,最高转速为 2 500 r/min,额定扭矩为 10 N·m。调幅伺服电机功率为 0.75 kW,额定扭矩 3.6 N·m。偏心块质量 m 为 8 kg,采用 45 号钢制作,偏心距 e 为 0 ~ 30 mm。滚珠丝杠螺距为 4 mm,有效行程 200 mm。半径可调式激振器总体质量为 48.3 kg。振动采收频率一般为 10 ~ 25 Hz。并且根据前期试验分析发现,当激振力频率为 10、15、19 Hz 时,果实掉落量较大。当激振力频率为 19 Hz,λ 为 70 mm,大部分的果实均已掉落,在每组参数下,当果树振动时间超过 8 s 时,几乎没有果实掉落。因此为研究激振力幅值对采净率的影响,每个频率对应的滚珠丝杠螺母行程 λ 分别为 20、50、70 mm。每次试验中,设定的采收时间均为 8 s。试验结果如图 9b 所示,激振器和果树通过丝杆螺母机构夹持。

通过计数方法统计果实采净率。每棵树振动结束后,捡拾落果并统计落果个数 N_e,并用人工敲打树上未脱落果实,统计其数量 N_m。采净率 P_h 计算式为

$$P_h = \frac{N_e}{N_e + N_m} \times 100\% \tag{6}$$

2.2　测试结果

3 棵果树挂果量依次为 325、287、309 个。统计 3 棵柑橘树的采净率，并取 3 棵果树果实的采净率平均值，如表 2 所示。由表 2 可知，随着半径可调式激振器频率和丝杠螺母行程的增大，果实采净率呈现出增大的趋势。当激振频率不变时，随着丝杠螺母行程 λ 的增大，果实采净率也呈现出增大趋势。

表 2　果实采净率

Tab. 2　Statistics of net fruit harvest rate

序号	激振力频率 f/Hz	丝杠螺母行程 λ/mm	第 1 棵树采净率/%	第 2 棵树采净率/%	第 3 棵树采净率/%	P_h 平均值/%
1	10	20	0	0	0	0
2	10	50	18.35	27.3	25.75	23.8
3	15	20	40.3	63.2	35.4	46.3
4	10	70	51.3	64.2	52.8	56.1
5	15	50	70.3	68.2	69.1	69.2
6	19	20	70.5	69.2	69.4	69.7
7	15	70	71.2	69.5	77.1	72.6
8	19	50	79.3	83.2	88.6	83.7
9	19	70	82.7	85.9	90.3	86.3

同时，测试半径可调式激振器幅频调节的特性，采用加速度传感器测试 2 个树枝加速度变化，如图 10 所示。传感器（WT9011DCL 型）加速度量程为 0 ~ 16 g（g = 9.8 m/s^2），安装于 2 个二级树枝上，如图 9b 所示，其中树枝 1 直径为 12.6 mm，树枝 2 直径约为 14.3 mm。加速度传感器 1 和加速度传感器 2 固定于距离树枝 1 和树枝 2 末端约 50 cm 处，此处为树枝挂果起始位置。发现当激振力频率为 10 Hz 时，偏心距 e 不断地增大，从 0 ~ 30 mm，树枝 1 和树枝 2 振动加速度呈增大趋势，如图 10a 和图 10b 所示。当增大激振力频率为 0 ~ 20 Hz，偏心距 e 从 30 mm 减小到 0 时，树枝 1 和树枝 2 的振动加速度呈先增大后减小趋势，如图 10c 和图 10d 所示。这表明半径可调式激振器具有振幅和激振力频率的调节特性。

为进一步分析激振力频率和振幅对果实采净率的影响，进行归类统计分析，如图 11 所示。如图 11a 所示，当激振力频率不变时，随着丝杠螺母行程增大，果实采净率呈增大趋势，但随着频率增大，发现丝杠螺母行程对果实采净率的影响程度降低。进一步分析激振力频率和激振力幅值对采净率的影响程度。增大激振力频率，减小丝杠螺母行程如图 11b 所示，果实采净率呈先增大后降低趋势，然而果实采净率降低幅度较小。根据图 11 的结果对比发现，激振力频率对果实采净率影响程度大于激振力幅值的对果实采净率的影响。

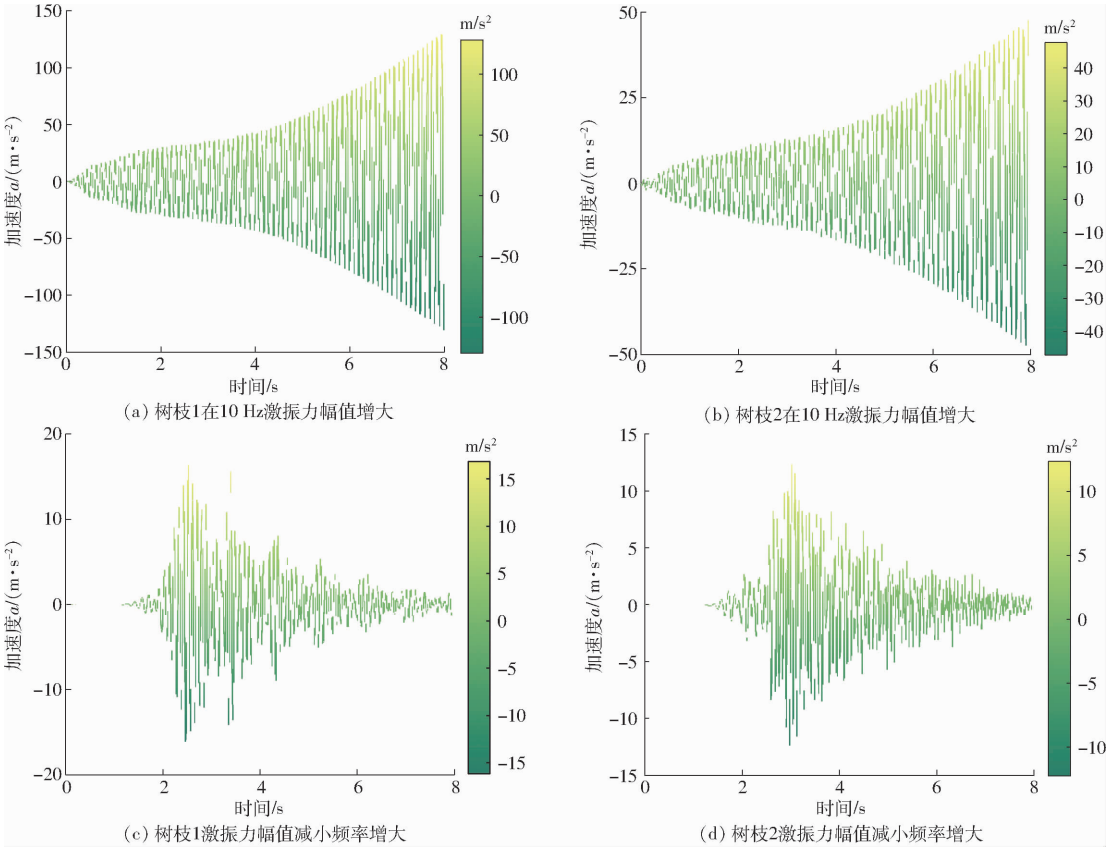

图 10　半径可调式激振器幅频特性

Fig. 10　Amplitude-frequency characteristics of radius adjustable exciter

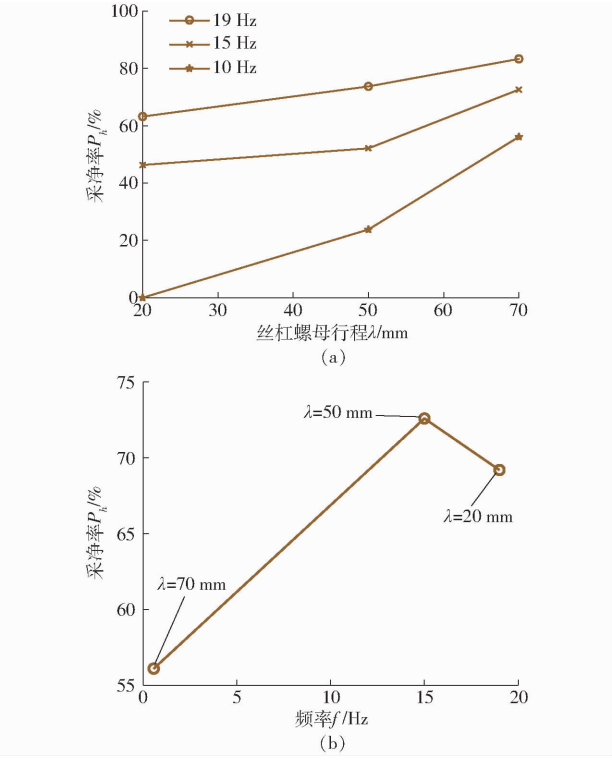

图 11 激振力频率和幅值对采净率的影响

Fig. 11 Influence of frequency and amplitude of excitation force on extraction rate

综上所述,激振力频率和激振力幅值对果实采净率的影响明显。在低频率林果振动采收时,激振力幅值对果实采净率的影响最为明显。随着频率的增大,激振力幅值调节对果实采净率的影响不明显。表明在高频率下,适当降低激振力幅值,果实采净率不会出现明显的波动,同时能够有效减少果树与激振器加持位置和果树根部损伤。

3 结论

(1)利用 TRIZ 理论物质-场模型对现有的激振器与果实作用过程进行分析,获得激振器和果树之间的物质-场模型和物理冲突。提出了半径可调式激振器,实现激振力幅值和频率的单独调节。其中激振力频率范围为 0 ~ 25 Hz,滚珠丝杠螺母行程为 0 ~ 200 mm,对应偏心块偏心距的半径为 0 ~ 30 mm。

(2)试验结果表明,当激振力频率相同时,增大激振力幅值,可提高果实采净率。当激振力频率增大时,果实采净率也呈增大趋势。当激振力频率为 19 Hz、滚珠丝杠螺母行程为 70 mm 时,果实采净率为 86.3%。

参 考 文 献

[1] 中国果品流通协会. 我国水果产业发展状况及柑橘产销形势分析[J]. 果农之友,2011(1):3 - 5.

[2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2019.

[3] 郑永军,江世界,陈炳太,等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2020,51(11):1 - 20.
ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 1 - 20. (in Chinese)

[4] 陈度,杜小强,王书茂,等. 振动式果品收获技术机理分析及研究进展[J]. 农业工程学报,2011,27(8):195 - 200.
CHEN Du, DU Xiaoqiang, WANG Shumao, et al. Mechanism of vibratory fruit harvest and review of current advance[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 195 - 200. (in Chinese)

[5] 付威,崔健,张慧明,等. 林果机械化采收技术研究及进展[J]. 农机化研究,2016,38(12):264 - 268.
FU Wei, CUI Jian, ZHANG Huiming, et al. The research and development of mechanization harvesting technology for forest fruit[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(12): 264 - 268. (in Chinese)

[6] 杜小强,李松涛,贺磊盈,等. 三维激振果品采收机构优化设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(16):48 - 55.
DU Xiaoqiang, LI Songtao, HE Leiying, et al. Optimal design and experiment on vibratory fruit harvesting mechanism with three-dimensional excitation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 48 - 55. (in Chinese)

[7] 杜小强,倪柯楠,武传宇. 基于外旋轮线轨迹的果品振动采收机构研究[J]. 农业机械学报,2016,47(3):59 - 66.
DU Xiaoqiang, NI Ke'nan, WU Chuanyu. Vibratory harvesting mechanism for tree fruit based on epitr ochoid[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 59 - 66. (in Chinese)

[8] DU Xiaoqiang, JIANG Feng, LI Songtao, et al. Design and experiment of vibratory harvesting mechanism for Chinese hickory nuts based on orthogonal eccentric masses[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 178 - 186.

[9] CASTRO-GARCIA S, BLANCO-ROLDAN G L, GIL-RIBES J A, et al. Dynamic analysis of olive trees in intensive orchards under forced vibration[J]. Trees-Structure and Function, 2008, 22(6): 795 - 802.

[10] CASTRO-GARCIA S, BLANCO-ROLDAN G L, FERGUSON L, et al. Frequency response of late-season 'Valencia' orange to selective harvesting by vibration for juice industry[J]. Biosystems Engineering, 2017, 155: 77 - 83.

[11] 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. Fruit motion analysis in process of mechanical vibration harvesting based on electronic fruit technique[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 58 - 64. (in Chinese)

[12] CARVALHO E D, MAGALHAES R R, SANTOS F L. Geometric modeling of a coffee plant for displacements prediction[J].

Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123: 57 – 63.

[13] FERREIRA L D, DA SILVA F M, FERREIRA D D, et al. Dynamic behavior of coffee tree branches during mechanical harvest[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173:105415 – 105423.

[14] HE L, ZHOU J F, DU X Q, et al. Energy efficacy analysis of a mechanical shaker in sweet cherry harvesting[J]. Biosystems Engineering, 2013, 116(4): 309 – 315.

[15] WANG B S, ZHAO X Y, PENG H J, et al. Evaluation of biomechanical properties of jujube branches and analysis of prediction accuracy based on multi-scale artificially simplified model[J]. Aip Advances, 2021, 11(4):45212(1 – 11).

[16] WANG B S, HE M, LI C S, et al. Microstructure and biomechanical characterisation of jujube branches[J]. Biosystems Engineering, 2020, 194: 165 – 176.

[17] 散鋆龙,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)

[18] 散鋆龙,杨会民,王学农,等. 振动收获过程中杏果实脱落的动态响应分析[J]. 农业工程学报,2018,34(18):68 – 75.
SAN Yunlong, YANG Huimin, WANG Xuenong, et al. Dynamic response analysis of apricot fruit dropping during vibration harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 68 – 75. (in Chinese)

[19] 许南南. 组合偏心块式三维激振林果采收机的设计与试验[D]. 杭州: 浙江理工大学,2018.
XU Nannan. Design and experiment on vibratory fruit harvesting mechanism with three-dimensional excitation[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2018. (in Chinese)

[20] 蒲应俊. 面向柑橘机械化收获的树冠振动系统设计与性能试验[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
PU Yingjun. Design and performance experiments of a canopy shaking system for mechanical harvesting citrus[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)

[21] 张付英,张林静,王平. 基于 TRIZ 进化理论的产品创新设计[J]. 农业机械学报,2008,39(2): 116 – 119,166.
ZHANG Fuying, ZHANG Linjing, WANG Ping. Study on product innovative design based on TRIZ evolution theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 116 – 119, 166. (in Chinese)

[22] SHEU D D, CHIU M C, CAYARD D. The 7 pillars of TRIZ philosophies[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 146: 1 – 8.

[23] SPREAFICO C. Quantifying the advantages of TRIZ in sustainability through life cycle assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 303: 17.

[24] 颜华,陈科,王海峰,等. TRIZ 创新方法在旱地高速移栽技术研究中的应用[J]. 农机化研究,2017,39(1): 197 – 201.
YAN Hua, CHEN Ke, WANG Haifeng, et al. TRIZ application in research of dry-land high-speed transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 197 – 201. (in Chinese)

[25] 罗金海,李志杰,张平. 基于 TRIZ 理论的方捆机喂入装置创新设计[J]. 中国农机化学报,2016,37(7): 38 – 41.
LUO Jinhai, LI Zhijie, ZHANG Ping. Innovative design on the feeding device of square bundle baler based on evolution theory of TRIZ[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7): 38 – 41. (in Chinese)

[26] 权龙哲,曾百功,马云海,等. 基于 TRIZ 理论的玉米根茬收获系统设计[J]. 农业工程学报,2012,28(23): 26 – 32.
QUAN Longzhe, ZENG Baigong, MA Yunhai, et al. Design of corn stubble harvester based on TRIZ theory[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(23): 26 – 32. (in Chinese)

[27] 曹卫彬,焦灏博,刘姣娣,等. 基于 TRIZ 理论的红花丝盲采装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(8): 76 – 82.
CAO Weibin, JIAO Haobo, LIU Jiaodi, et al. Design of safflower filament picking device based on TRIZ theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 76 – 82. (in Chinese)

[28] 李芮,衣淑娟,赵斌,等. 基于 TRIZ 理论的气吸式排种器创新设计[J]. 农机化研究,2018,40(7): 195 – 199.
LI Rui, YI Shujuan, ZHAO Bin, et al. Innovative design of airsuction seed metering device based on TRIZ theory[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(7): 195 – 199. (in Chinese)