

林果振动采收装备及研究方法

张洋¹ 许林云¹

(1.南京林业大学机械电子工程学院 210037)

摘要: 随着机械化的发展,采用更高效的机械化采收代替人工是必然趋势。振动采收技术成为提高果实采收效率的重要手段。根据不同激振方式,和不同激振位置对振动采收装置进行分类,分析了其工作原理及应用效果。基于振动采收,国内外学者从振动采收影响因素,树体传递特性,树体动力学建模这几个方面进行研究。同时,聚焦于果实的研究,具体加速度传感器,高速摄影仪,子系统动力学建模等方法。通过对树体与果实响应的研究对采收装置进行合理的优化。并对林果采收未来发展做出展望。

关键词: 振动采收; 林业机械; 振动响应; 研究现状

Vibratory harvesting equipment for forest fruits and research methods

Zhang yang¹ Xu linyu¹

(1.南京林业大学机械电子工程学院 210037)

Abstract: With the development of mechanisation, it is an inevitable trend to adopt more efficient mechanised harvesting instead of manual labour. Vibratory harvesting technology has become an important means to improve the efficiency of fruit harvesting. According to different excitation methods, and different excitation position of vibration harvesting device classification, analysed its working principle and application effect. Based on vibratory harvesting, scholars at home and abroad research from the vibratory harvesting influencing factors, tree transmission characteristics, tree dynamics modelling. At the same time, focusing on the study of the fruit, specific acceleration sensor, high-speed camera, subsystem dynamics modelling and other methods. Through the study of the tree and fruit response to the harvesting device for reasonable optimisation. And make a prospect for the future development of forest fruit harvesting.

Keywords: vibration harvesting; forestry machinery; vibration response; research status

0 前言

近年来,我国林果产业在农业生产中占据了重要的地位,林果是国民膳食结构必不可少的品类,也是果农用于增收的重要经济作物^[1]。《中国统计年鉴 2023》数据显示,2022 年我国果园面积达 1301 万公顷,林业类作物总经济产值为 6820.8 亿元^[2]。目前,国家加大了扶持林果产业的发展也带动了地方的经济发展;推动林果产业发展,也是扶贫的重要举措:对于地理位置偏僻、经济基础设施落后的南疆,光照充足,气候适宜,劳动力丰富,林果产业发展历史,已经成为了南疆农村地区的重要产业,特色林果产业的种植已经成为其最主要的经济收入来源^[3,4]。山东邹城富产核桃、大枣、樱桃和苹果,林果产业丰富,近年来,随着大量优质水果的引进,促进了邹城的林果经济发展^[5]。甘肃陇西县,近年来抓黄河流域生态保护和高质量发展战略契机,将林果业发展作为战略新兴主导产业以促进经济发展^[6]。近年来,社会经济迅速发展

的同时,人们对经济林果产品的需求也呈现急剧增加的发展趋势。经济林果产业作为一个有效增收的产业,在我国得到了广泛推广。

1 振动采收装备研究

我国对果树采收机械研究起步较晚,一般像柿子、杏、桃一样的鲜果成熟后主要依靠人手采摘。人手采摘对于小面积的果树比较容易,但对于大面积且高处的果实,人工采摘就需要大量的劳动力,且需要付出大量的劳动成本,采摘效率低,如果稍有不慎触碰到鲜果枝条就会使果实掉落,造成损失。对于像核桃、银杏、红枣一样的干果,多采用摇晃果树,用竹竿敲打的方式使果实掉落在地上,之后由人工捡拾,费时费力^[7]。为了提高采收效率,降本增效,振动采收核桃是最有效的采收方式^[8-10]。振动采收是通过夹持装置固定住果树,并施以一定的振幅和频率,使果树树干产生受迫振动,通过树枝将振动传递至果实,使果实脱落^[11-14]。

1.1 振动类型分类

从振动类型进行分类,在振动收获机中,激振器通常被称为振动装置,按照工作原理可以分为机械振动式和气力振动式。气力振动装置利用压缩的高强度气流,其工作过程中不与树枝直接接触,而是通过气流作用使树枝产生振动。相比之下,机械振动装置需要直接接触树枝,通过施加外力使树枝振动,从而使果实因振动加速度作用而从果柄处脱落。常见的机械振动装置包括惯性激振装置、弹性连杆激振装置和液压激振装置等。根据机械振动装置产生振动的不同方式,可以进一步细分为偏心振动、轴向振动以及多边形油击杆等类型。目前主要是偏心式激振和曲柄连杆式激振这两种激振方式较为适用。

曲柄连杆式激振装置通过曲柄与连杆的结合,将旋转运动转化为往复振动。当电动机驱动曲柄旋转时,偏心的曲柄推动连杆移动,产生振动。通过调节曲柄的半径和转速,可以控制振动的幅度和频率。WHITNEY 等^[15] 等对比了曲柄滑块机构和偏心旋转机构在果树振动采收中的效果,发现偏心旋转机构在不使用化学脱落剂的情况下,落果率明显高于曲柄滑块机构。在振动采收过程中,变向周期激励使得不同枝条能受到不同方向的横向或轴向振动,激振力方向随时间变化,将振动能量传递到各个枝条。而直线往复激励所产生的作用力无法有效激励不同方向的枝条,因此,变向周期激励在果实振动采收中更具优势。

偏心式激振可分为单偏心式激振和对称偏心激振。单偏心激振通过一个偏心块的旋转产生激振力,偏心块固定在旋转轴上,旋转时产生的离心力使设备整体发生振动,这种振动直接作用于果树的树干或树冠,从而使果实脱落。单偏心块在特定角速度下进行圆周运动,沿 X、Y 轴产生恒定的离心力。木合塔尔等^[16]

基于这一原理设计了一种林果振荡采收机,配备的行走装置具备一定的爬坡和越沟能力。对称的双偏心块在特定角速度下进行圆周运动。在 X 轴方向,两个偏心块产生的分力大小相同且方向一致,因此相互叠加;而在 Y 轴方向,两个偏心块的分力大小相同但方向相反,从而相互抵消。如图 1。王长勤等^[17] 研制的偏心式林果振动采收机主要由激振装置、升降机构和夹持机构构成,搭载电控履带车作为动力,具有较小的操作空间需求。激振机构采用半圆式偏心块,激振头通过升降机构调整位置。

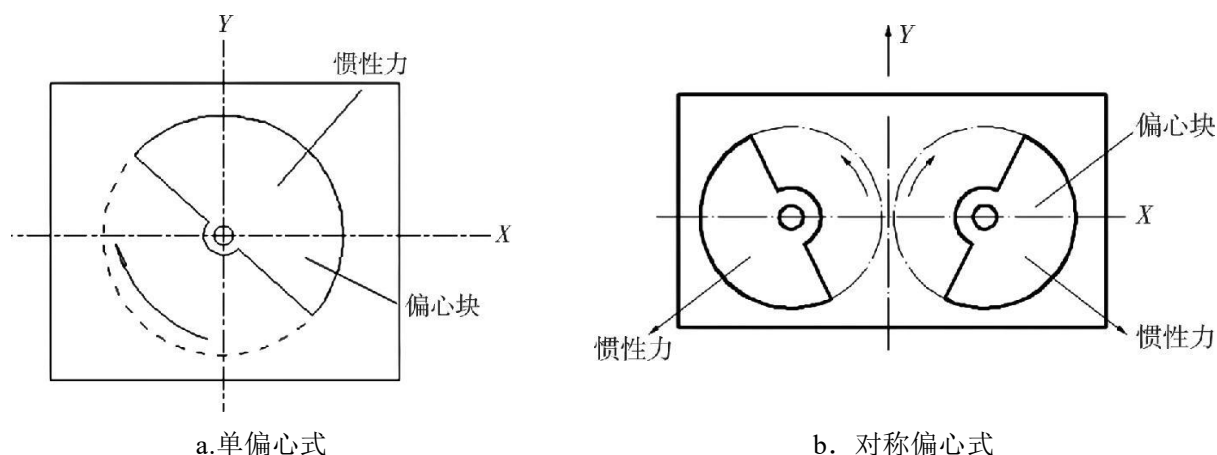


图 1 偏心激励方式
Fig.1 eccentric excitation method

1.2 激励位置分类

将振动采收分为树枝振动、树冠振动和树干振动 3 种。树枝振动系统主要由激励装置、夹紧装置和动力源三部分组成。当夹紧装置固定在树干上时，激励装置会将振动传递到树干，导致树枝振动，从而使果实脱落。这种树枝振动采收技术能够选择性地收获果实，同时对非目标树枝的影响较小，适合于成熟度差异较大的林果采收。^[18]

树冠振动技术通常适用于植株较矮、果实较小的果树。主要采用梳齿式设计，将多个梳齿排列在一起，通过梳齿的旋转和往返运动来实现果实采收。不同密度的梳齿可以针对不同大小的水果进行有效采集。大多数树冠采收机配备了一系列振动杆，这些振动杆插入树冠中，以特定频率使枝条振动，从而实现果实与枝条的分离。

树干振动是目前应用较为广泛的振动方式，树干振动相较于树枝振动和树冠振动具有显著优势，它能够直接作用于树干，具有更高的果实采净率。树干振动适用于多种果树，特别是较高的树种，具有更强的适应性。同时，树干的稳定性使得振动过程不易受到外部因素的影响，从而保证采收的连续性和一致性。

2 林果振动采收研究方法

2.1 振动采收影响因素

针对果树振动采收机的性能的测试相关人员进行了大量的研究，比如研究了激振频率、激振力、激振时间、激振位置等振动参数和树体本身的一些生长形态特征以及果实的成熟度对采收率以及落果率的影响^[13]。

Blanco-Roldán^[19]等采用连续式振动收获机进行了油橄榄采收试验，研究了振动持续时间对收获效率的影响。他们发现，在收获季节的初期和中期，10 秒的振动持续时间（+10 秒的间歇）比连续振动 20 秒的收获效果更佳，而在收获季开始时，平均振动持续时间为 13.3 秒时，果实的采收率可达 90%。Parameswarar Kumar 和 Gupta^[20]通过通过曲柄滑块式采收机进行芒果采摘的对比试验，结果表明，在振幅为 76-102 毫米、振动频率为 11-13Hz、振动时间为 4 秒的条件下，获得了最大的净采率，并且此时对果树的损伤最小。Castillo 等^[21,22]研究了橄榄树不同位置下的振动收获采收率，结果表明，位于橄榄树顶部和靠近树冠外侧的果实占整个采收的 60%以上，而冠层内部和下部的果实采收相对较困难且产量较少。基于这一研究，

Castillo 还提出通过修剪树型来调整果树结构,以适应机械采收,从而提高产量。

综上所述,针对振动采收的激振参数对果实的采摘率进行了研究与分析,但大都为着眼于果树整体响应和整体落果率的研究,针对树枝振动和果实振动的局部运动的细致研究还相对匮乏。

2.2 树体振动响应特性研究

2.2.1 振动传递特性研究

研究振动传递特性对于振动采收机的设计以及相关参数优化提供必要的理论基础。振动能量从采收机到树干再到各级树枝,最后到枝条末端是一个逐级递减的过程,果树中振动能量的传递效率直接关系到果实的采收率,而这一效率受到树枝节点和分枝结构的显著影响^[23]。因此,需要研究果树振动过程中的传递特性,从而确定最佳的激振参数,以达到最好的落果效果。

ola-Guirado R R^[24,25]等在橄榄树的根部、主干以及振动筛上部署了加速度测量设备。他们分别在主干的两个不同高度施加振动,以此来探究振动筛产生的振动是如何在橄榄树体内传播的。研究发现,无论是在较低还是较高的位置施加振动,树枝和树干的加速度读数都显著增加。振动向地下部分的传递过程中,其加速度值在很大程度上被衰减。同时,他们还提出了一种计算模型用于模拟有叶和无叶树枝在强迫振动下的振动响应,并在实验室进行了实际的振动响应测试,如图2所示。Cg A^[26]等在两个果园内选取了11根具有果实和相似茎粗的次生枝条。实验中,这些枝条被固定在底部,参照图3所示的方法。他们利用电磁振动器对枝条施加了垂直于分枝的单向振动,并据此确定了振动的传递路径。在输入端和不同传播路径的终点,他们安装了压电传感器。该研究旨在分析在三种不同生长状态(即有叶有果、有叶无果、无叶无果,见图4)下的振动传递特性。Taymaz Homayouni^[27]等人使用无线3D加速度传感器被构建并用于测量通过树冠在不同位置处的振动传输,并监测机器振动器头与树干之间的能量传输。Tombesi^[28]等人将四个加速度传感器分别布置在夹持点上部 and 橄榄树枝干主要枝干处,测试不同振动频率下移除营养枝和未移除营养枝时树干到树枝的加速度传递,通过数据分别分析了不同激振频率下加速度传递、营养枝对加速度传递和采收效果的影响。



图2 试验布置现场
Fig.2 Test setup site

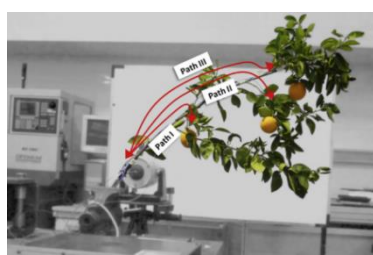


图3 枝干固定及传递路径划分
Fig.3 Branch fixation and transfer path delineation



图4 不同状态果枝
Fig.4 Fruiting branches in different states

2.2.2 树体动力学建模

果树的动力学建模主要包括简化等效模型与有限元模型。Theckes^[29]等将最简单的Y型分枝结构简化为弹簧-集中质量模型,如图5所示。Murphy^[30]等基于物理杆模型,将果树的振动方程在平衡位置附近简化为线性方程,分析了具有一级分枝的果树模态及振型。国内一些学者也将果树简化为简单的集中质量与梁杆模型进行分析。林欢等^[31, 32]采用集中质量模型、等截面和变截面物理杆构建了三种不同冠型的果树动力学模型,实验模态辨识结果表明变截面的多杆模型计算最为精确。这些简化模型在一定程度上反映了果树的动态特性,但往往忽略了多模态分枝的响应,树枝结构的微小变化也可能显著影响整体动力学特性。近年来,随着科技的不断发展,一些研究将果树进行三维重建后进行有限元分析,以此模拟和优化采收

过程,以较短的时间进行大量的计算来识别收获参数对于振动收获的影响^[33, 34]。Savary 等^[35]通过测绘果树结构参数,使用 Solidworks 进行三维建模,并在 ANSYS 软件中进行有限元仿真研究,得到柑橘树模型在受迫振动下的动态响应。Rodriguez 等人^[36]分析果树的整体模态,发现树干的固有频率低于侧枝,并尝试使用基于梁单元的有限元模型分析复杂树木的动力学特性^[37]。Bentaher 等人^[38]利用 COSMOSM 数值模拟软件对橄榄树进行三维重构,建立了较为精确的振动模型,比较了在不同偏心块激振下的响应,发现多向激振使果树获得更大加速度响应。有限元建模方法相比于简化模型,能够构建更复杂的果树结构,并获得更准确的结果。然而,这种方法也不可避免地忽略了一些细小的分支结构。随着果树模型复杂度的增加,自由度增多,计算成本和时间消耗显著增加。尽管计算机性能的提升在一定程度上缓解了这一问题,开发高效的建模计算方法依然是许多研究者追求的目标。

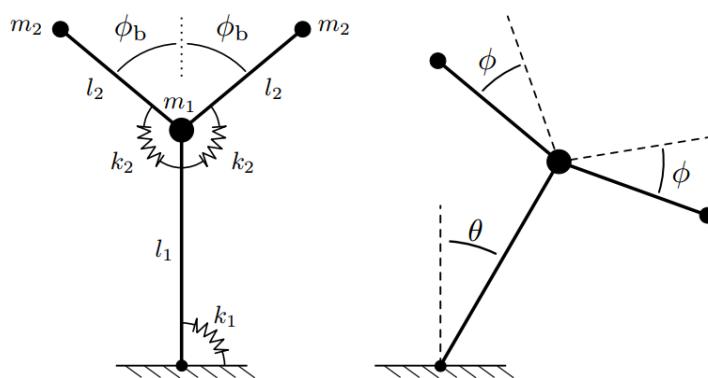


图 5 基于弹簧-质量系统的 Y 型果树模型

Fig.5 Y-shaped fruit tree model based on spring-mass system

2.3 果实振动响应特性研究方法

研究果实的振动响应特性对于振动采收中振动参数的选择提供必要的理论基础。振动采收过程中,振动能量由果树枝干传递给柄果子系统后,果实的振动脱落取决于子系统的动态响应。对于子系统,最直接的研究方法是采用振动试验的方法研究果实动力学特性。

2.3.1 加速度传感器技术

He 等^[40]在田间实验中,将加速度传感器固定在苹果表面,测量了果树受迫振动时不同位置果实的加速度响应,通过分析激励点,探讨了果实位置对振动过程中脱落的影响。Castro-Garcia 等^[41]在田间实验中,将加速度传感器嵌入柑橘果实内,使用三种不同的树冠振动采收装置对柑橘树进行了采收试验。通过对比分析不同激振条件下果实的加速度,进一步优化了采收装置。但不可避免的是,传感器给果实带来的附加质量会在很大程度上改变果实原有的物理特性。特别是当被测量的果实较小时,传感器及连接线的质量会极大地影响果实原有的振动特性,所测得的结果也就会造成相当大的偏差。

2.3.2 高速摄影仪和图像处理技术

高速摄影仪和图像处理技术克服了利用传感器进行测试时产生附加质量的缺点,并且能够得到果实响应时详细的运动姿态,如图6。基于这些优点,这种非接触式的测量方法成为试验研究果实运动的主要方式^[42, 43]。



图 6 图像采集系统

Fig.6 Image Acquisition System

Zhou^[44]等利用高速摄影仪研究了枣果在水平、垂直和旋转激振模式下的运动响应,分类了其落果特性。Torregrosa^[45]等利用高速摄影仪研究柑橘运动图像,分析其位移和加速度等动态参数的响应关系,发现果实运动的平移方向的力大于果实的切向力。韩元顺^[46]等人通过高速摄影仪记录果实振动全过程,研究了果实不同激振方向下的振动响应情况,发现板栗果实不同激振参数组合下形成的水平与垂直响应位移差异较大及对应的响应运动轨迹变化。蔡菲等^[47]利用高速摄影仪跟踪分析了杏果在脱落过程中瞬时速度与加速度的变化规律,得出银杏果实脱落所需的最大惯性力。傅隆生等^[48]用高速相机记录不同振动频率(15、20、25 Hz)下冬枣果实的运动轨迹,计算在振动过程中的枣果脱落类型、脱落时间和运动轨迹,以及果实脱落时的运动参数,得出脱落类型、脱落时间和运动轨迹与频率之间的关系。Liu^[49]等人使用三向加速度传感器和双目高速摄影仪研究了不同频率、不同振幅下核桃的加速度响应变化曲线以及核桃脱落与未脱落的运动形态,核桃的主要运动形态为变加速水平直线运动和摆动组合以及变加速度垂直直线运动,合成运动轨迹为椭圆。

综上国内外均利用高速摄影仪结合图像处理方法对果实的运动状态进行了分析,但对果实在动态下的果柄结合力以及具体的运动姿态分析还不够透彻,需要对其进行进一步探究。

2.3.3 子系统动力学模型构建

试验手段只能在宏观上去描述受迫振动下果实的动力学响应,很难得到子系统的固有内在振动特性,因此需要通过建立子系统动力学方法对果实的振动响应从理论层面进行辅助研究。

Jiale Cao 等^[50]建立局部振动模型,将不同振动参数与局部果柄-果枝振动模型相结合,得出在频率为10Hz、振幅为80mm的振动响应中,果枝与果柄、果柄与尾果、果柄与侧果连接点惯性张力最大分离比分别为0、25.5%和26.3%;惯性弯矩的最大分离比为86.4%、96%和83%。散望龙等^[51,52]建立杏果实-果枝双摆和杏树-采收机动力学模型,从杏果的成熟程度、激振方式和杏果振动动态响应等方面进行了深入的研究,采用高速摄影系统对杏果的振动响应进行了试验研究,验证了其理论模型的准确性。

综上,果实在振动过程中其运动状态较为复杂,通过建立更为细致的子系统动力学模型,对果实振动特性与脱落机理研究提供指导意义。

2.4 振动采收装置的优化设计

对振动采收机进行优化设计可以提高采摘效率、降低损伤率、减少能源消耗、延长机械寿命等方面的性能指标,从而提高果树采摘的自动化水平和生产效益。国内外学者们通过理论分析果树振动采收机的结构、运动学和动力学等特性,推导出数学模型,进而预测和优化机械的性能和行为;也有利用计算机辅助工具建立果树振动采收机的三维模型,通过数值模拟对机械的运动、力学和振动等特性进行分析和优化;

还通过实验测试对果树振动采收机的性能进行评估,包括机械的振动幅度、采摘效率、损伤程度等指标,以便对机械进行优化设计和改进。

李灿^[53]等人设计了一种梳摆式荔枝采收机,采用 ANSYS Workbench 软件进行模态分析,对结构前四阶模态进行分析,通过建立优化模型,优约束条件,对优化后的参数组合进行研究分析,对比优化值与设计初始值的分析结果优化后的可展单元在满足强度、刚度和稳定性的情况下,整体质量减轻 0.43 kg,收集装置总体减轻 2.56 kg。孙浩博^[wy45]建立了清选收集装置和采摘头的仿真模型,进行 DEM-CFD 耦合仿真正交试验,分析了各参数对花椒果实的影响规律并分别建立了清选收集装置和采摘头花椒果实损伤率与各因素之间的二次多项式回归模型,以最小花椒果实损伤率为目标进行优化,获得了较优参数组合。逯泽鹏^[54]对振动采收装置的关键零部件偏心轴、传送齿轮以及夹持爪进行了强度分析并进行优化设计实现了部件质量减轻,将优化设计之后的部件进行建模通过有限元求解对固有振动特性进行分析以确保关键零部件在优化后不发生共振而损害部件。Wei^[55]等人建立了刚性振动机构和开心果树的刚柔耦合动力模型,通过模拟果树的动态响应研究了各个特征点与激振位置的关系,研究各影响因素对机械采收效率的影响对参数进行优化并对实验结果进行响应面分析确定优化后的开心果振动采收系统优于优化之前,最终通过现场试验证明了优化参数的准确性。

综上,目前对采收机进行优化主要对承载振动装置的车架进行轻量化、针对激振装置与承载车架之间的共振情况,对承载车架进行优化设计、针对收集装置与果实之间的共振对果实损伤情况,对收集装置进行优化。而振动装置本身作为振动的来源其本身关键部位在工作过程中所存在的共振情况会对装置本身造成极大的损伤,因此,针对振动采收机的振动装置主要零部件之间所存在的共振情况,对结构进行优化对于优化整个振动采收系统具有指导性意义。

3 研究展望

针对林果振动采收装备的研究,建议未来的工作应聚焦于开发多功能、适应性强的采收机械,以适应不同树型和果实特性;同时,应加强智能化技术的应用,如集成传感器和人工智能算法,还应重视操作安全性和人体工程学设计,减轻操作人员的劳动强度,提高作业安全性。通过政策支持和市场推广,加速新技术的应用和普及,以提升整个林果产业的采收效率 and 经济效益。

参 考 文 献

- [1]岳金果. 2020. 浅析林果产业化发展中存在的问题及对策[J]. 现代农村科技, 582(02): 13.
(Yue J G. 2020. Analysis of Problems and Countermeasures in the Industrial Development of Fruit Trees. Modern Rural Science and Technology, 582(02): 13. [in Chinese])
- [2]中华人民共和国国家统计局. 2023. 中国统计年鉴2023[J]. 北京: 中国统计出版社.
(National Bureau of Statistics of China. 2023. China Statistical Yearbook 2023[J]. Beijing: China Statistics Press.)
- [3]马博涛, 邓佳佳. 2021. 乡村振兴视阈下南疆特色林果产业发展现状及破局路径[J]. 农业与技术, 41(17): 172-174.
(Ma B T, Deng J J. 2021. Current Situation and Solutions of Specialty Fruit Industry in Southern Xinjiang under the Perspective of Rural Revitalization. Agriculture and Technology, 41(17): 172-174. [in Chinese])
- [4]杨海明. 2020. 发展林果产业 实现精准扶贫[J]. 内蒙古林业, (10): 21-23.
(Yang H M. 2020. Developing Fruit Industry to Achieve Targeted Poverty Alleviation. Inner Mongolia Forestry, (10): 21-23. [in Chinese])
- [5]杨冠军, 盛英. 2021. 邹城市林果产业发展现状与对策[J]. 中国农村科技, 316(09): 32-33.
(Yang J G, Sheng Y. 2021. Current Situation and Countermeasures of Fruit Industry Development in Zoucheng City. China Rural Science and Technology, 316(09): 32-33. [in Chinese])
- [6]赵兰英. 2022. 林果产业为乡村振兴赋能增效——对甘肃省陇西县林果产业发展的调查[J]. 农业科技与信息, 651(22): 5-7+11. (Zhao L Y. 2022. The Role of Fruit Industry in Empowering Rural Revitalization: A Survey on the Development of Fruit Industry in Longxi County, Gansu Province. Agricultural Science and Technology Information, 651(22): 5-7+11. [in Chinese])
- [7]罗自瑶, 杨淑华, 张秀花, 等. 2021. 核桃采摘机械的研究现状及发展趋势[J]. 河北农机, (03): 12+14.
(Luo Z Y, Yang S H, Zhang X H, et al. 2021. Research Status and Development Trend of Walnut Harvesting Machinery. Hebei Agricultural Machinery, (03): 12+14. [in Chinese])
- [8]Xin Z, Long H, Yaqoob M, et al. 2018. A Precision Pruning Strategy for Improving Efficiency of Vibratory Mechanical Harvesting of Apples[J]. Transactions of the ASABE, 61(5): 1565-1576.
- [9]Zhou J, He L, Whiting M, et al. 2016. Field evaluation of a mechanical-assist cherry harvesting system[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 9(4): 324-331.
- [10]Gupta K S, Ehsani R, Kim N. 2015. Optimization of a Citrus Canopy Shaker Harvesting System: Properties and Modeling of Tree Limbs[J]. Transactions of the ASABE, 58(4): 971-985.
- [11]Polat R, Gezer I, Guner M, et al. 2007. Mechanical harvesting of pistachio nuts[J]. Journal of Food Engineering, 79(4): 1131-1135.
- [12]陈度, 杜小强, 王书茂, 等. 2011. 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, 27(8): 195-200.
(Chen D, Du X Q, Wang S M, et al. 2011. Mechanism Analysis and Research Progress of Vibratory Fruit Harvesting Technology[J]. Transactions of the CSAE, 27(8): 195-200. [in Chinese])
- [13]Hoshyarmanesh H, Dastgerdi H R, Ghodsi M, et al. 2017. Numerical and experimental vibration analysis of olive tree for optimal mechanized harvesting efficiency and productivity[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 132: 34-48.
- [14]Velloso N S, Magalhes R R, Santos F L, et al. 2020. Modal properties of coffee plants via numerical simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 175: 105552.
- [15]Gardiner B A. 1989. Mechanical characteristics of Sitka spruce[M]. Edinburgh: Forestry Commission.
- [16]木合塔尔·米吉提, 玛依努尔·托乎提, 吾尔泥沙·吐尼牙孜. 2018. 振动式林果采收机的机械化应用与试验研究[J]. 农机化研究, 40(5): 105-110.
(Mugaitar M, Mayinuer T, Wernisha T. 2018. Mechanical Application and Experimental Research of Vibratory Harvesters for Fruit Trees[J]. Agricultural Mechanization Research, 40(5): 105-110. [in Chinese])
- [17]王长勤, 许林云, 周宏平, 等. 2012. 偏心式林果振动采收机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 28(16): 10-16.
(Wang C Q, Xu L Y, Zhou H P, et al. 2012. Development and Experiment of Eccentric Vibratory Harvester for Fruit Trees[J]. Transactions of the CSAE, 28(16): 10-16. [in Chinese])

- [18]路平. 2014. 核桃采摘振动参数的研究[D]. 西安: 陕西科技大学.
- (Lu P. 2014. Study on Vibration Parameters for Walnut Harvesting[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology.)
- [19]Castro-García S, Blanco-Roldán G L, Gil-Ribes J A, et al. 2008. Dynamic analysis of olive trees in intensive orchards under forced vibration[J]. *Trees-Structure and Function*, 22(6): 795-802.
- [20]Parameswarakumar M, Gupta C P. 1991. Design parameters for vibratory mango harvesting system[J]. *Transactions of the ASAE*, 34(1): 14-20.
- [21]Francisco J, Castillo-Ruiz, Jiménez-Jiménez F, et al. 2015. Analysis of fruit and oil quantity and quality distribution in high-density olive trees in order to improve the mechanical harvesting process[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(2): 2-9.
- [22]Francisco J, Castillo-Ruiz, Pérez-Ruiz M, et al. 2015. Development of a Telemetry and Yield-Mapping System of Olive Harvester[J]. *Sensors*, 15(2): 4001-4018.
- [23]Xiaoqiang D, Chuanyu W, Leiying H, et al. 2015. Dynamic characteristics of dwarf Chinese hickory trees under impact excitations for mechanical fruit harvesting[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(1): 17-25.
- [24]SOLA-GUIRADO R R, BERNARDI B, CASTRO-GARCIA S, et al. 2018. Assessment of aerial and underground vibration transmission in mechanically trunk shaken olive trees[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 49(3): 191-197.
- [25]SOLA-GUIRADO R R, LUQUE-MOHEDANO R, TOMBESI S, et al. 2022. Effect of leaves in the dynamic response of olive tree branches and their computational model[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 203.
- [26]CASTRO-GARCIA S, ARAGON-RODRIGUEZ F, ARIAS-CALDERON R, et al. 2020. The contribution of fruit and leaves to the dynamic response of secondary branches of orange trees[J]. *Biosystems Engineering*, 193: 149-156.
- [27]Homayouni T, Gholami A, Toudeshki A, et al. 2022. Estimation of proper shaking parameters for pistachio trees based on their trunk size[J]. *Biosystems Engineering*, 216: 121-131.
- [28]Tombesi, Poni, Palliotti, et al. 2017. Mechanical vibration transmission and harvesting effectiveness is affected by the presence of branch suckers in olive trees[J]. *Biosystems Engineering*, 158: 1-9.
- [29]Theckes B. 2012. Damping by branching of flexible structures: a bioinspiration from trees[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 4(6): 46010.
- [30]Murphy K, Rudnicki M. 2012. A physics-based link model for tree vibrations[J]. *American Journal of Botany*, 99(12): 1918-1929.
- [31]林欢, 许林云, 宣言, 等. 2019. 基于集中质量的银杏树动力学建模研究[J]. *中国农机化学报*, 40(11): 81-88.
- (Lin H, Xu L Y, Xuan Y, et al. 2019. Dynamics Modeling of Ginkgo Trees Based on Concentrated Mass[J]. *Journal of Agricultural Mechanization*, 40(11): 81-88. [in Chinese])
- [32]林欢, 许林云, 宣言, 等. 2020. 基于物理杆的多级Y型银杏树动力学建模及试验[J]. *林业工程学报*, 5(3): 121-129.
- (Lin H, Xu L Y, Xuan Y, et al. 2020. Dynamics Modeling and Experiment of Multi-Level Y-Shaped Ginkgo Trees Based on Physical Rods[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 5(3): 121-129. [in Chinese])
- [33]Hoshyarmanesh H, Dastgerdi H R, Ghodsi M, et al. 2017. Numerical and experimental vibration analysis of olive tree for optimal mechanized harvesting efficiency and productivity[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 132: 34-48.
- [34]Yung C, Fridley R. 1975. Simulation of vibration of whole tree systems using finite elements[J]. *Transactions of the ASABE*, 3(18): 475-481.
- [35]Savary S K J U, Ehsani R, Schueller J K, et al. 2010. Simulation Study of Citrus Tree Canopy Motion During Harvesting Using a Canopy Shaker[J]. *Transactions of the ASABE*, 53(5): 1557-1568.
- [36]Mathieu Rodriguez E D L A. 2008. A scaling law for the effects of architecture and allometry on tree vibration modes suggests a biological tuning to modal compartmentalization[J]. *American Journal of Botany*, 95(12): 1523-1537.
- [37]Rodriguez M, Moulia S P, Langre E D. 2012. The Multimodal Dynamics of a Walnut Tree: Experiments and Models[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 79(4): 4505.
- [38]Bentaher, Haddar, Fakhfakh, et al. 2013. Finite elements modeling of olive tree mechanical harvesting using different shakers[J]. *Trees*, 27(6): 1537-1545.
- [39]Oliveira Z R C R, Santos F L, Valente D, et al. 2018. Mechanical properties of the rachis from macaw palm bunches[J]. *Acta Agronómica*, 40(1): 39504.

- [40]He L, Fu H, Karkee M, et al. 2017. Effect of fruit location on apple detachment with mechanical shaking[J]. *Biosystems Engineering*, 157: 63-71.
- [41]Castro-Garcia, Aragon-Rodriguez, Sola-Guirado, et al. 2019. Vibration Monitoring of the Mechanical Harvesting of Citrus to Improve Fruit Detachment Efficiency[J]. *Sensors*, 19(8): 1760.
- [42]Villibor G P, Santos F L, Queiroz D M D, et al. 2016. Determination of modal properties of the coffee fruit-stem system using high speed digital video and digital image processing[J]. *Acta Scientiarum Technology*, 38(1): 41.
- [43]Castillo-Ruiz F, Tombesi S, Farinelli D. 2018. Tracking olive fruit movement and twisting during the harvesting process using video analysis[J]. *Acta Horticulturae*, 1199: 409-414.
- [44]Zhou J, Xu L, Xuan Y, Xu Y, Liu G. 2020. Shedding frequency and motion of jujube fruits in various excitation modes[J]. *Transactions of the ASABE*, 63(4): 881-889.
- [45]Torregrosa A, Albert F, Aleixos N, et al. 2014. Analysis of the detachment of citrus fruits by vibration using artificial vision[J]. *Biosystems Engineering*, 119: 1-12.
- [46]韩元顺, 许林云, 周杰, 等. 2021. 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*, 6(03): 133-141.
- (Han Y S, Xu L Y, Zhou J, et al. 2021. Analysis of Vibration Detachment Characteristics of Chestnut Fruits Based on High-Speed Photography[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 6(03): 133-141. [in Chinese])
- [47]蔡菲, 王春耀, 王学农, 等. 2013. 基于高速摄像技术的振动落果惯性力研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 41(04): 208-212.
- (Cai F, Wang C Y, Wang X N, et al. 2013. Study on Inertial Forces of Vibratory Fruit Drop Based on High-Speed Imaging Technology[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 41(04): 208-212. [in Chinese])
- [48]傅隆生, 刘智豪, 冯亚利, 等. 2018. 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*, 23(08): 135-141.
- (Fu L S, Liu Z H, Feng Y L, et al. 2018. Analysis of Vibration Detachment Law of Winter Jujube Fruits Based on High-Speed Photography[J]. *Journal of China Agricultural University*, 23(08): 135-141. [in Chinese])
- [49]Liu C, Xu D, Cao J. 2023. Vibration Response of Walnuts under Vibration Harvesting[J]. *Agronomy-Basel*, 13(2).
- [50]Jiale C, Xiaopeng B, Daochun X, et al. 2023. Experiment and analysis on walnut (*Juglans regia* L.) shedding force based on low-frequency vibration response[J]. *Industrial Crops and Products*, 204(PA).
- [51]散望龙, 杨会民, 王学农, 等. 2018. 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*, 34(08): 10-17.
- (San Y L, Yang H M, Wang X N, et al. 2018. Effects of Vibration Methods and Frequencies on the Response of Apricot Trees to Vibration Harvesting[J]. *Transactions of the CSAE*, 34(08): 10-17. [in Chinese])
- [52]散望龙, 杨会民, 王学农, 等. 2018. 振动收获过程中杏果实脱落的动态响应[J]. *农业工程学报*, 34(18): 68-75.
- (San Y L, Yang H M, Wang X N, et al. 2018. Dynamic Response of Apricot Fruits During Vibratory Harvesting[J]. *Transactions of the CSAE*, 34(18): 68-75. [in Chinese])
- [53]李灿, 黄卓朗, 林嘉铨, 等. 2022. 梳摆式荔枝采收模拟与优化设计[J]. *现代农业装备*, 43(06): 45-53.
- (Li C, Huang Z L, Lin J Q, et al. 2022. Simulation and Optimization Design of the Rake-type Lychee Harvesting[J]. *Modern Agricultural Equipment*, 43(06): 45-53. [in Chinese])
- [54]逯泽鹏. 2022. 振动式核桃采摘机虚拟样机设计及动力学仿真[D]. 哈尔滨: 陕西科技大学.
- (Lu Z P. 2022. Design and Dynamic Simulation of a Virtual Prototype for Vibratory Walnut Harvester[D]. Harbin: Harbin University of Commerce.)
- [55]Wei J, Yang G Y, Yan H, et al. 2021. Rigid-flexible coupling simulation and experimental vibration analysis of pistachio tree for optimal mechanized harvesting efficiency[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 28(22): 2360-2369.