

林果机械振动采摘理论与装备研究进展

靳文婷^{1,2} 赵金辉^{1,2} 庄腾飞^{1,2} 刘忠军^{1,2} 杨学军^{1,2} 刘立晶^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 中国是林果起源地之一, 采摘是林果产业生产中的重要环节。机械化采摘是实现代替人工作业进行林果快速收获的重要手段之一, 是现代化农业发展驱动下的必然走向。机械振动采摘是目前应用最为广泛的技术, 林果采摘机械的工作性能主要由振动效果决定。因此, 本文通过对国内外各类林果机械振动采摘装备的研究分析, 归纳出影响振动采摘的因素、果树三维重构与等效模型、果实振动脱落特性以及振动能量传递与耗散等4大关键机械振动采摘理论, 并阐明了各理论目前存在的不足。在此基础上阐述了国内外林果机械化采摘装备的研究现状和进展, 分析了林果机械式采摘机的适用范围、工作原理及分类, 总结了典型振动式及接触式采摘机的机型和技术参数, 指出了各机型应用作业产生的实际问题。结合林果产业应用场景和发展要求, 分析了中国林果机械化采摘面临的主要问题, 认为缺乏系统性理论研究、关键技术研究进展缓慢是制约林果机械化发展的关键, 提出了未来林果机械化采摘的技术重点是高效、精准、低损收获, 最终为实现林果自动化、智能化采摘的建议。

关键词: 林果; 机械化采摘; 采摘机; 振动理论

中图分类号: S-1; S225.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0144-17

Review on Theory and Equipment of Mechanical Vibration Picking of Forest Fruits

JIN Wenting^{1,2} ZHAO Jinhui^{1,2} ZHUANG Tengfei^{1,2} LIU Zhongjun^{1,2} YANG Xuejun^{1,2} LIU Lijing^{1,2}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Science Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: China is one of the origins of forest fruits, and picking is an important part of forest fruit industry production. Mechanized picking is one of the important means to achieve rapid harvesting of forest fruits instead of manual work, which is an inevitable direction driven by the development of modern agriculture. Mechanical vibration picking is currently the most widely used technology, and the working performance of forest fruit picking machinery is mainly determined by the vibration effect. Therefore, through the research and analysis of various types of forest fruit mechanical vibratory picking equipment at home and abroad, four key mechanical vibratory picking theories were summarized, such as factors affecting vibratory picking, three-dimensional reconstruction and equivalence model of fruit trees, fruit vibratory shedding characteristics as well as vibratory energy transfer and dissipation, and the current deficiencies of each theory were elucidated. On this basis, the research status and progress of mechanized picking equipment for forest fruits at home and abroad were described, the scope of application, working principle and classification of mechanical pickers for forest fruits were analyzed, the models and technical parameters of typical vibratory and contact pickers were summarized, and the practical problems arising from the application operation of each model were pointed out. Combined with the application scenarios and development requirements of the forest fruit industry, the main problems faced by China's forest fruit mechanized picking were analyzed, and it was believed that the lack of systematic theoretical research and the slow progress of key technology research were the key constraints to the development of forest fruit mechanization, and it was put forward that the technical focus of the future forest fruit mechanized picking would be on high-efficiency, precise, and low-loss picking, and that ultimately, it would be necessary to achieve the automation of forest fruit and intelligent picking proposals.

Key words: forest fruit; mechanized picking; picking machine; vibration theory

收稿日期: 2023-05-20 修回日期: 2023-08-26

基金项目: 中国机械工业集团有限公司青年科技基金项目(QNJJ-PY-2022-24)

作者简介: 靳文婷(1996—), 男, 博士生, 主要从事农业机械装备及关键技术研究, E-mail: 198053043@stu.jmsu.edu.cn

通信作者: 刘立晶(1976—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事种植机械技术与装备研究, E-mail: xyliulj@sina.com

0 引言

中国地跨寒、温、热三带,林果种类丰富。2020 年水果种植面积 $1.264\,63 \times 10^7\text{ hm}^2$,产量超 $2.8 \times 10^9\text{ t}$,均为世界首位^[1]。林果产业已成为种植业中位列粮食、蔬菜之后的可使农民创收致富的新亮点和重要产业。果实采摘是林果生产过程中的一个重要环节,所需劳动力占全过程的 35% ~ 45%^[2]。另外,林果采摘面临季节限制、作业周期短、人工成本高且采摘效率低等问题^[3],严重制约了林果产业的进一步发展,提升林果采摘机械化、智能化迫在眉睫。

林果机械化采摘是确保果实及时、高效及无损收获的关键。虽然我国目前已研发出部分林果采摘装备,但采摘部件与果实的直接或间接接触,易造成果实破损,且林果采摘机理不完善。目前,国内外针对坚果类、加工葡萄等非鲜食类(加工)的林果多使用机械式采摘机^[4-6]。而猕猴桃、柑橘和苹果等鲜食类的林果采摘在国外已有多款采摘机器人可进行田间作业^[7],但国内还多处于关键技术攻关与开发测试阶段^[8-9]。林果机械式采摘机的性能主要体现在果树振动效果。影响振动效果的因素可概括为机械装备的工作参数和果树形态与力学特性,如,振动频率、振动幅度、激振方式和持续时间以及果品种类、树木高度、直径和果实成熟度等^[10-11]。总体来说,林果振动采摘装备整体趋向高效、无损及果品高质量发展。未来完善果树振动机理、提高机械结构适应性将大大提升林果振动采摘装备的工作性能。

近些年,国内外针对林果采摘装备主要有机械式采摘机、气力式采摘机和采摘机器人^[12-13]。机械式是目前应用最广泛、技术相对成熟的林果采摘装备,其基本原理是通过不同机械结构使果树受迫振动,达到果实与果柄或果柄与果枝分离的效果^[14-16]。因此首先对林果机械式振动采摘理论的研究动态进行归纳分析,主要包括振动采收影响因素、果树三维重构与等效模型、果实振动脱落特性及振动能量传递与耗散。林果机械式采摘机是机械化时代产物,具有广泛代表性;林果采摘机器人是智能化时代产物,具有未来林果采摘产业前瞻性^[17-18]。基于此又对国内外典型林果机械式采摘机的研究现状进行介绍。在对国内外林果振动采摘理论及机械化采摘装备的研究进展基础上分析我国林果机械化采摘面临的问题以及未来林果机械化采摘技术的发展趋势,以期为我国林果机械化采摘的进一步发展提供参考。

1 振动采摘理论研究现状

近些年,国内外针对林果机械振动采摘的理论研究主要集中在振动采收影响因素、果树三维重构与等效模型、果实振动脱落特性及振动能量传递与耗散等方面,如图 1 所示。

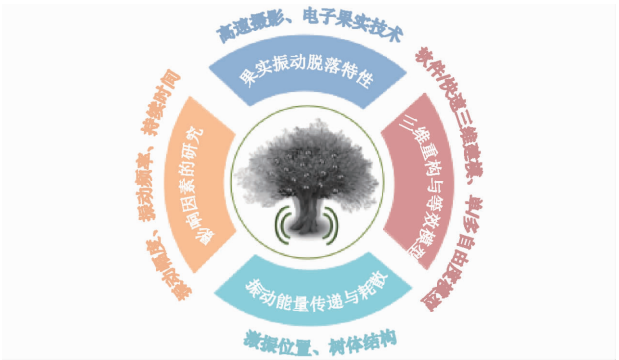


图 1 振动采摘理论体系

Fig. 1 Vibratory picking theory system

1.1 振动采摘影响因素

1.1.1 振动频率、振幅和振动时间

针对林果振动采摘机械通过给定不同水平下的振动频率和振幅以及持续时间进行试验研究,采用优化设计方法从中找出一组既能达到最高的落果率且又不破坏果树或果实的最佳工作参数,以此来设计科学、有效及可靠的振动采收装备。表 1 为典型林果试验的研究结果。

表 1 振动频率、振幅和时间对落果率的影响

Tab.1 Influence of vibration frequency, amplitude and time on fruit drop rate

研究对象	振动频率/ Hz	振动幅 度/mm	振动 时间/s	落果率/ %	文献 序号
杏	15.00	40	5	97.97	[19]
银杏	1.00 ~ 5.25	较高	5 ~ 11	85.30	[20]
开心果	20.00	50	10	95.50	[21]
橄榄	24.00	60	20	96.00	[22]
扁桃	15.00	50	10	97.99	[23]

TORREGROSA 等^[24]在不同月份(前一年 10 月一次年 6 月)进行振动采收柑橘试验,得到振动频率和持续时间对树体损伤的影响。高频率和长时间振动导致树叶脱落严重,树皮只在 5 月底和 6 月被损坏。BLANCO-ROLDÁN 等^[25]研究了振动持续时间和振动重复次数对橄榄收获季节的 3 个时期落果率的影响。在收获初期和中期,两次间歇振动(10 s + 10 s)比一次连续振动(20 s)的落果率更高,但重复振动对后期落果率的影响并不显著。收获初期要达到与收获后期相同的落果率所需振动时间更长。ORTIZ 等^[26]对柑橘进行田间试验也表明,延长

振动时间和重复振动不会提高落果率,中等频率和高振幅可以达到最佳收获效果。杨会民等^[27]采用三因素三水平正交试验探究了激振时间、振动频率和振幅等振动特性因素对杏树振动采摘果实脱落的影响。通过多目标优化及试验验证得到3个振动特性因素的最佳工作参数分别为7.207 s、15 Hz和10 mm时,各检测点加速度均为最大值。

通过已有研究可知,林果振动采收达到较高的落果率,需要高振幅、低于果树固有频率的振动频率和适宜的振动时间。振动频率超过果树固有频率及过长振动时间会对果树造成伤害。另外,针对不同期成熟的林果,收获前、中期可采用总时长与连续振动时长相同的多次间歇振动。

1.1.2 成熟度

林果成熟度是影响采收时间、方式和果实品质以及评价采收装备性能的重要影响因素之一。随着现代检测手段快速发展,机器视觉^[28]、深度学习^[29]和近红外无损检测^[30]等方法广泛应用于果实成熟度检测。

对于林果机械振动采摘则更多关注果实成熟度对落果率的影响。散鋈龙等^[31]探究了成熟度对杏果实采摘的影响。研究表明杏果实成熟度与果柄分离力呈负相关,即随着杏果实的不断成熟,果柄处分离力逐渐减小。韩元顺等^[32]对板栗不同成熟度果实的落果率随激振频率变化进行研究。成熟果实的落果率随激振频率呈三次增长曲线关系;未成熟果实的落果率随激振频率呈二次增长曲线关系。

1.1.3 激振方式

不同激振方式对林果振动采收的效果不同。林果振动采摘装备通过不同的激振方式施加一定频率和振幅的激振力,使果树产生振动。目前常见的激振源主要有两种机构:一种是提供直线往复激励的曲柄滑块机构^[33],另一种是输出平面内变向周期激励的偏心旋转机构^[34]。WHITNEY等^[35]对比了曲柄滑块机构和偏心旋转机构两种振动方式对果树的振动采收效果,结果表明在不喷洒化学脱落剂的情况下,偏心旋转机构的落果率远高于曲柄滑块机构的落果率。果树在振动采收过程中,变向周期激励可以使不同枝条受到不同的横向或轴向振动,激振力方向随时间变化,将振动能量传输到各个枝条,而直线往复激励产生的作用力无法使不同方向的枝条都产生有效振动。因此,变向周期激励相较于直线往复激励更有利于果实振动采收。

偏心旋转机构经过对偏心块的不同组合、形状改变和空间结构的布置可以得到不同的振动机构,

主要有单偏心振动机构和对称偏心振动机构,如图2所示。单偏心振动机构产生圆周激励,而对称偏心振动机构根据不同偏心质量块与转速可以产生不同形式的非圆周激励。散鋈龙等^[36]对比分析了单偏心式和对称偏心式激励下对杏树振动响应特性,结果表明:在相同振动频率下单偏心式激励可产生更高的平均果枝分离惯性力,而对称偏心式激励可使果树不同区域获得更为均匀的果枝分离惯性力。因此,对称偏心振动机构对杏树的振动采收效果优于单偏心振动机构。

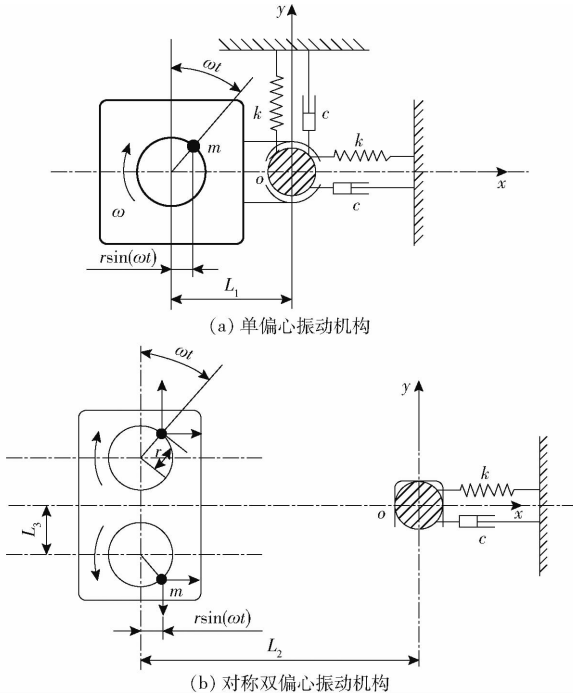


图2 偏心旋转机构示意图

Fig. 2 Schematics of eccentric rotation mechanism

对于林果枝条振动采收,需多次变换激振位置,频繁振摇容易对果树造成伤害。国内学者针对该问题设想了一种基于林果树枝激振的非圆周激励形式——旋轮线振动采收机构。杜小强等^[37]提出一种行星齿轮外旋轮线振动采收机构,如图3所示。李松涛^[38]提出一种连杆旋轮线振动采收机构,如图4所示。通过理论计算、仿真分析及试验研究表

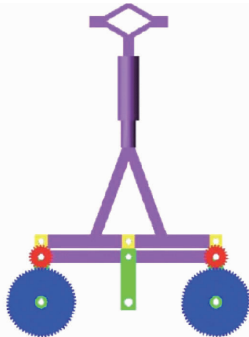


图3 行星齿轮外旋轮线采收机构

Fig. 3 Planetary gear external rotation wheel line type



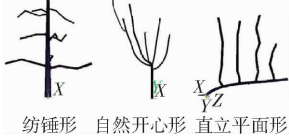
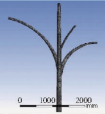
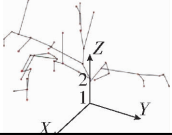
图 4 连杆旋轮线采收机构

Fig. 4 Connecting rod rotary wheel line type

明:基于旋轮线振动采收机构的振动方式能够有效激发果树不同生长方向的枝条振动,使不同区域的果实获得均匀的分离惯性力,实现林果“单点激振,整体采收”的采收效果^[39]。

表 2 果树三维模型与响应特性研究

Tab. 2 Three-dimensional model and response characteristics of fruit trees

应用软件	模型	研究结论	文献序号
Pro/E、ANSYS		构建了 3 种典型整形果树模型,得到双体多向加载适合纺锤形果树,单体回旋型加载适合自然开心形和直立平面形果树	[41]
SolidWorks、Abaqus		开心果果树前 15 阶固有频率范围为 10.5 ~ 58.6 Hz,其中第 1(10.5 Hz)、4(15.3 Hz)、5(17.3 Hz)阶时振型响应满足振动收获响应特性	[42]
UG、Workbench		通过模态和谐响应分析,得到核桃树最适振动频率为 15.4 Hz	[43]
Geostar		构建了橄榄树振动模型,得到激振器类型、激振位置和激励频率的响应关系	[44]

对于已知材料特性的果树,其响应特性可以通过有限元方法进行模拟。然而,果树结构(形态学、拓扑学和几何学)是高度复杂的,对相关参数进行采集耗时耗力。另外,有限元方法忽略了树叶与果实对果树简化建模,模型精度低。

(2)快速三维重建

随着先进传感器技术、信息技术与电子仪器技术的发展,将机器视觉、三维扫描和先进传感器等技术应用到果树的快速三维重建^[45-46],如表 3 所示。

机器视觉技术对树类的三维重构方法主要步骤为:①图像中枝干区域的提取。②枝干骨架的提取。③枝干的对应。④枝干三维坐标的恢复^[55]。TENG 等^[56-57]采用双目或多目视觉的方法拍摄不同视角的图像来重建树的枝干。TAN 等^[58]通过采集覆盖 120°~200°范围的 10~20 幅图像组成图像集来生

1.2 果树三维重构与等效模型

为了了解果树振动采收过程的响应特性,通常利用数值分析和三维重构等方法建立理想化果树三维模型和简化等效模型,以此为研发果树振动采摘机械提供设计依据及理论基础。

1.2.1 果树三维重构

(1)三维建模

果树振动采摘机械设计研发周期长,采用有限元法对果树进行模拟分析^[40],得到果树最佳振动因素参数,可以有效减少机械设计研发时间,大大加快机具装备走向市场进程。果树模拟过程包括三维建模与有限元模型的建立。一些研究人员利用软件建立相应模型对果树振动响应特性进行试验分析,如表 2 所示。

成树的三维模型。HUANG 等^[59]提出了一种结合 L-system 和 MCMC 的产生式概率方法来提取三维的无叶树枝结构。基于机器视觉的果树三维重建技术对信息采集设备性能要求不高,难点在于算法的设计和实现,且算法不具备通用性。另外,该技术受环境干扰明显,系统鲁棒性低。

三维扫描技术对树类三维重构的过程为:①三维扫描设备提供点云数据。②依据一定的规则和算法实现树的三维模型^[60]。三维扫描设备的扫描原理有:激光扫描、激光雷达扫描(LiDAR)和磁场跟踪等。CHAU 等^[61]采用多光束闪光激光雷达扫描获取无花果树点云数据并进行三维重建,探究了台风对果树的动态响应。SINOQUET 等^[62]采用基于磁场跟踪原理的扫描设备 3SPACE FASTRAK 对胡桃树进行扫描并实现三维重建。基于三维扫描的果树

表 3 快速三维重构技术的应用

Tab. 3 Application of rapid 3D reconstruction technology

重构技术	方法	目的	文献序号
机器视觉	采用双目立体视觉对果树树枝识别、定位及三维重构	采摘机器人避障及路径规划	[47]
	RGB-D 相机和信息融合技术对苹果树进行三维重建和果实识别与定位	采摘机器人进行果实采摘	[48]
	基于双轮廓同步跟踪提取果树枝干并利用双目视觉技术对核桃树三维重建	果实自适应振动收获	[49]
	不同角度架设 3 台相机拍摄桃树,实现果树三维重构及花朵识别	自动去除多余的花朵	[50]
三维扫描	FARO Laser Scanner Focus3D 激光扫描仪扫描实现苹果树冠层叶片重建	树体冠层光合作用的研究、整形修剪、农业仿真试验	[51]
	Leica C10 激光扫描仪对樱桃树叶片进行扫描重建	果树生长或衰老过程中的自然组织变形	[52]
先进传感器	Kinect v2 传感器采集果树点云数据对桃树进行三维重建与骨架提取	果园评估作物状态、智能化修剪	[53]
	超声波传感器测量果树冠层体积技术对荔枝树冠层三维重构和体积测量	农药变量喷施、肥料精准施用和果产预估等果园精细管理	[54]

三维重建技术精度高、采集范围广和效率高,但三维扫描设备昂贵、扫描精度受天气的影响。

先进传感器技术对果树三维重构的过程与三维扫描果树重构步骤基本一致。该技术具有定位精度高、实时性好和系统鲁棒性强等优势,但数据融合处理相对复杂。

1.2.2 果树等效模型

果树系统一体化研究复杂多变,通常将果树系统假设为主根-土壤、树干-主根和树冠等单自由度模型进行独立理论分析^[63]。LÁNG^[64]将果树系统简化为包含弹性模量、有效质量和阻尼系统的树干-主根模型,如图 5 所示。HORVATH 等^[65]进行果树振动采收过程中,发现果树主根-土壤也产生振动。通过在树干和土壤中安装加速度传感器进行试验,结果表明,激励点位置越高,主根-土壤振动有效质量比重越小。

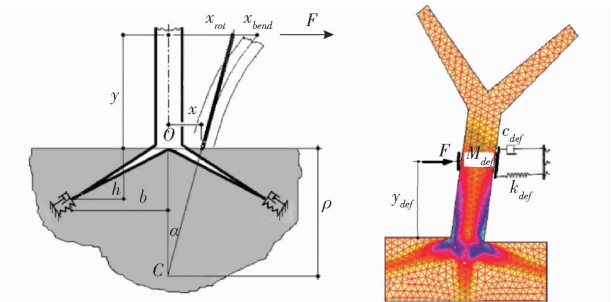


图 5 单自由度模型

Fig. 5 Single degree of freedom model

果树系统单自由度模型,具有物理特性一致性,不能表达出果树侧枝、果柄和果实在受迫振动下的响应特性。LÁNG 等^[66]提出一种主根-土壤、树干-侧枝双自由度模型,如图 6 所示。VILLIBOR 等^[67]采用柔性体建模方法对咖啡果柄系统进行了动力学分析,建立了侧枝-果柄-咖啡果模型,定义果柄为由

4 个扭转弹簧连接组成的柔性梁。通过仿真研究了咖啡果与果柄连接处的力和力矩、传递的能量以及作用在果柄上的合力。

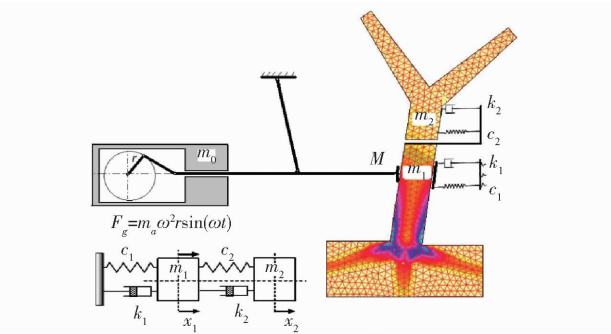


图 6 双自由度模型

Fig. 6 Two degree of freedom model

总得来说,果树简化模型主要有集中质量模型与杆件模型两种方式。林欢等^[68-69]采用集中质量和多级物理杆方式分别构建了银杏树简化模型,研究表明:变截面多杆模型精度大于等截面多杆模型精度,大于多级弹簧-质量-阻尼(集中质量)模型精度,但构建果树模型的杆件越多,计算难度越大。果树振动简化模型以刚体运动为基础,自由度较少,其结果仅能反应果树部分振动特性,与实际果树振动存在较大误差。

1.3 果实振动脱落特性

1.3.1 高速摄影技术

为探究林果振动采摘方式下果实脱落特性及运动变化规律。相关学者利用果树激振装置进行振动落果试验。试验过程中在合适位置摆放数目不同的高速摄影仪对果实脱落过程进行跟踪拍摄(图 7),然后通过后处理软件对图像进行跟踪、捕捉、分析和计算,确定影响果实脱落的主要参数、明晰果实分离位置及果实运动轨迹等^[70-71]。

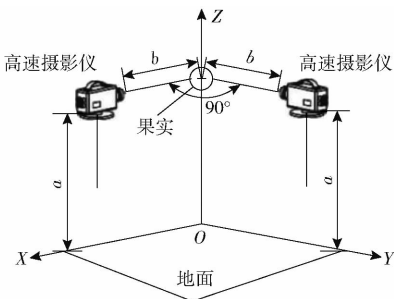


图 7 高速摄影仪摆放示意图

Fig. 7 Schematic of high-speed camera placement

蔡菲等^[72]通过高速摄影仪和图像后处理软件 Phantom 对杏果实振动采收过程中速度对果实脱落的影响分析表明:杏果实与枝干的相对瞬时速度出现峰值时,果柄横截面断裂,果实脱落。杏果实振动脱落过程瞬时速度的变化为增大、减小、匀速。吕梦璐等^[73]对所处不同位置果实的速度和加速度变化规律对落果的影响进行研究发现:当激振点与振源同侧时,与振源距离越远分枝,瞬时速度、加速度越大;同枝干、不同位置果实,距离振源越近越容易脱落。散望龙等^[74]利用高速摄影技术观察到杏果实-果柄系统发生受迫振动后,杏果实振动脱落过程主要分为果柄摆动、果柄扭转和果实倾摆 3 种运动形式,空间运动轨迹近似椭球形,如图 8 所示。韩元顺等^[75]对板栗振动采收过程中果实脱落特性和运动轨迹研究表明:板栗果实振动脱落分离主要有果柄与果枝分离和果实自栗苞中脱落两种方式。在小振幅(5 mm)、低频率(6 ~ 10 Hz)激振下,果实运动轨迹主要为直线型或弧线型。在较大振幅(10 mm 和 15 mm)下,低频激振引起振幅 1 倍左右的附加位移。当激振频率达到 22 Hz 时,无论振幅多大,果实均呈惰性响应运动状态。CASTILLO-RUIZ 等^[76]对橄榄果实振动采收脱落运动过程研究表明:影响橄榄果实振动脱落的主要影响因素是由扭转运动产生的弯曲和惯性力,扭转运动通常不超过 90°。

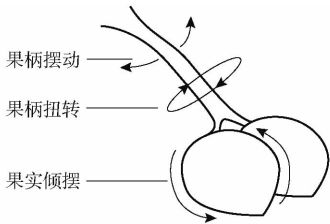


图 8 杏果实-果柄运动形式

Fig. 8 Motion of apricot fruit – stem

高速摄影技术已成为研究果实振动脱落特性的主要方法之一,但其对试验条件要求高,如图像采集区域需要高强度光源且无遮挡^[77]。

1.3.2 “电子果实”技术

果实振动脱落过程中,果实与果实、果实与树体

的相互碰撞极易造成果品损伤^[78]。20 世纪 70 年代,为了模拟果实采收时的运动状态^[79],提出一种“电子果实”技术,其是采用先进传感器来检测采收装备对果实的冲击作用以及果实与果实间的碰撞作用^[80],由“电子果实”采集的数据来分析实际果实在不同阶段的动态信息^[81]。国内外几种应用“电子果实”技术进行模拟振动采收果实损伤检测,如表 4 所示。

表 4 基于“电子果实”技术的研究成果
Tab. 4 “Electronic fruit” technology

电子果实类型			检测方式	适用果实	文献序号
Impact Recording Device (IRD)			加速度检测传感器	苹果、番茄	[82]
Berry Impact Recording Device (BIRD)			加速度检测传感器	蓝莓等小型浆果	[83]
Orange Impact Recording Sensor (OIRS)			加速度检测传感器	沙糖桔	[84]
Pressure Measuring Sphere (PMS)			压力检测传感器	苹果、洋葱等果蔬	[85]

目前,越来越多针对不同大小、形状的林果和不同功能的“电子果实”被研制,并应用于林果采摘过程数据采集。研究根本目的是通过模拟真实果实大小形状和采收某一环节等采收装备对果实的冲击和果实与果实间的碰撞,并运用先进的微型传感器与芯片方便快捷地记录碰撞位置、大小和频率等^[86]。最终为优化林果机械化采摘装备性能和降低果实损伤提供依据。

“电子果实”外壳采用材料与果实外皮材料的生物力学性能还存在较大差异。后续研究应重点突破“电子果实”外壳材料,以便更准确地模拟采收装备对果实的冲击和果实与果实间的碰撞。

1.4 振动能量传递与耗散

林果机械振动采收过程中能量以能量波的形式在树体中进行传递,传递的过程中具有滞后性和损耗,能量的耗散是由于阻尼效应和冲击后弹性模量的变化引起的^[87]。明晰林果机械振动采收过程中能量的传递与损耗,有助于平衡落果率与果树或果实损伤的关系。通过能量传递试验分析不同激振位置和树体结构等因素对果树能量传递特性的影响,获取果树树枝振动动态特性,从而为林果振动采摘方式、激振点的选择以及振动采收机构的设计提供参考^[88]。

1.4.1 激振位置对能量传递的影响

在不同夹持位置施加激振,振动能量的传递与激振力对树体影响不同。夹持位置高,激振力力矩大,可能导致树根损伤甚至断裂;夹持位置低,振动

能量传递到果柄-果实时所获动能小,造成落果率低。因此,林果振动采摘时选择合适的激振位置,可提高振动能量的有效利用。

SOLA-GUIRADO 等^[89]统计了在橄榄树树干不同位置施加激振分别传递到树枝、树干及树根部位的能量耗散情况,振动过程中大部分能量向树枝端传递,少部分能量向根部传递,由于果树根部弹性元件吸收弹性变形能量、阻尼元件吸收土壤振动能量,传递的能量被逐渐耗散,因此越向下的树根所获得的能量越少。耿雷^[90]通过试验得到蓝莓树根部传递振动能量耗散与影响因素间的关系为:根部振动能量的衰减与等效刚度、土壤阻尼系数和根部粘连土壤深度成正比,与根部粘连土壤半径成反比。伍德林等^[91]对冠层激振采摘油茶果过程中研究发现,能量从开始接触的枝条传递到路径末端时损失严重。能量从冠层激振位置传递到结果处距离越长,果实所获动能越小。

1.4.2 树体结构对能量传递的影响

果树结构千差万别,树干直径、分枝数量及粗细等结构的不同直接影响激振能量能不能均匀地传递到果实处。研究树体结构对振动能量的传递对于林果的振动采收是十分必要的。

DU 等^[92]研究发现横向分枝较少的甜樱桃树树体能量传递效率较高。瞿维等^[93]对杏机械振动采收过程研究表明:激振位置在树干上时,树枝与树干的夹角越小,各采样点在摆动方向获得的动能越大。HOMAYOUNI 等^[94]对开心果不同直径树干对振动传递能量影响研究表明:中等直径的树干,从位置 S1 到 S3 加速度一直增加,但传递到位置 S4 时加速度开始下降。大直径的树干,从位置 S1 到 S2 加速度减小,然后加速度开始增加直至分支末端,如图 9 所示。崔文哲等^[95]试验表明:振动传递到无患子粗细分支的能量不均匀,分支越粗,吸收传递振动能量越明显。

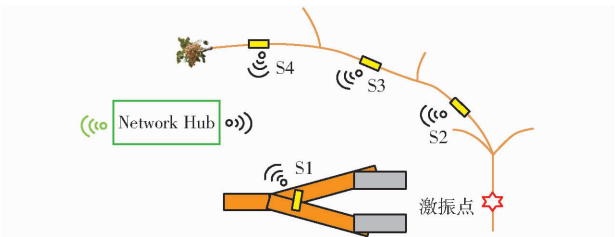


图 9 传感器安装示意图
Fig. 9 Schematic of sensor installation position

2 林果采摘装备研究现状

林果机械式采摘机主要由采摘装置、动力装置以及行走和收集装置(部分装备)组成。其按照采

摘装置工作原理的不同可分为振摇式、接触式和撞击式。上述 3 种形式按照工作时在果树激振位置的不同又可划分为树干激振和树枝激振方式。

树干激振方式主要包含撞击式和振摇式(部分)。该方式通过在树干处施加一定频率和振幅的激励,绝大部分激振能量通过树干向上传递到各分枝,可以一次振动整体采收,如图 10a 所示。但该方式由于作用于树干,因此所需夹持力和激振能量大,可能对接触部位树皮造成损伤、脱落和树根晃动、断裂。王长勤^[96]、刘梦飞^[97]讨论了激振频率对核桃树干损伤的影响,得出激振频率越大,树干挤压渗水越明显,其它对果树生长或结果的影响未见深入研究。

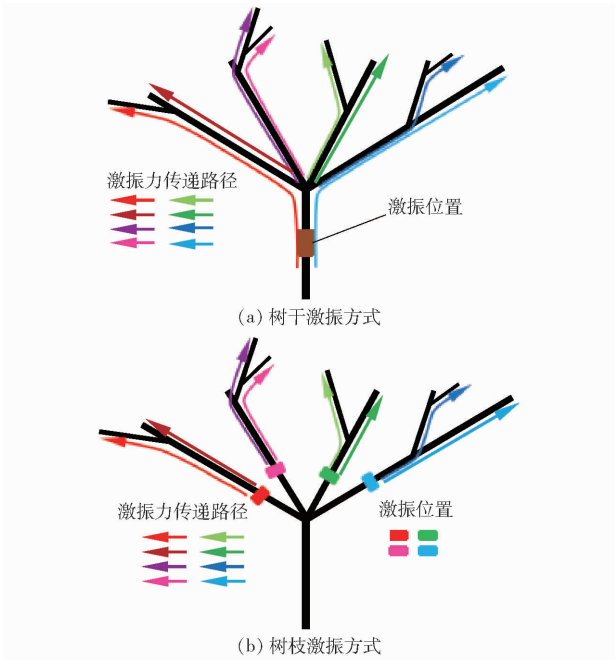


图 10 激振位置及激振力传递示意图
Fig. 10 Excitation position and excitation force transmission diagrams

树枝激振方式主要包含接触式和振摇式(部分)。该方式通过在果树主要分枝处施加一定频率和振幅的激励进行振摇或者直接对果实进行拍打、梳刷等,绝大部分激振能量只通过接触分枝向上传递,采收一棵果树需多次变化激振位置,如图 10b 所示。由于该类装备直接与枝叶接触,造成分枝损伤或折断以及大量树叶脱落,不利于分期成熟的林果脱落,还有可能影响下一年减产。曹成茂等^[98]对便携式山核桃高空拍打装备试验表明:该装备的果实采净率、果树损伤与拍打频率呈正相关,果树具体损伤程度及影响未见深入研究。

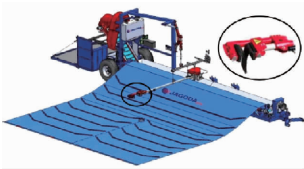
2.1 振摇式林果采摘机

目前,振摇式采收机广泛应用于核桃、银杏和橄榄等(机械化采收的果实质量对果皮破损要求

不高)林果的收获^[104]。其按照机械化程度分为便携式、牵引式和自走式等,典型机型及技术参数如表 5 所示。振摇式采收机主要由振动发生装置、夹持装置和接收果装置(部分装备包含)等结构组成。其中振动发生装置主要有曲柄滑块和偏心旋

转两种机构^[105]。夹持装置按照夹持力与激振力方向的不同,可分为两力平行夹持和两力法向夹持,如图 11 所示。两力平行夹持机构对果树夹持部位物理损伤和夹持果树直径范围小于两力法向夹持机构。

表 5 振摇式采收机
Tab.5 Vibratory harvester

类别	机型	总体结构	技术参数
便携式	中国农业机械化科学研究院集团有限公司 4GD-50Z 型电动干果采摘机 ^[99]		动力来源:锂电池 续航时间:6~8 h 频率:1 000 次/min(3 挡可调) 质量:4.8 kg(不含电池) 采收高度:4 500~6 500 mm
	临沂瓦力机械设备有限公司 4ZG-25 型果树振动采收机 ^[100]		配套拖拉机动力:≥51.5 kW 采收果树直径:80~250 mm 激振振幅:≤50 mm 激振频率:10~12 Hz 工作效率:≥40 棵/h 外形尺寸:2 800 mm×1 750 mm×2 200 mm
牵引式	意大利 SICMA S. p. A. 公司 TR-50 型橄榄振动采收机 ^[101]		配套拖拉机动力:≥44.8 kW 采收树干/树枝直径:≤480 mm 伸缩臂最大伸展 5 000 mm 外形尺寸:3 625 mm×4 500 mm×1 648 mm
	波兰 JAGODA JPS Agromachines 公司 G-004 型果实收获机 ^[102]		采收果树直径:50~210 mm 工作效率:50~60 棵/h 作业需要 3~4 人操作 外形尺寸:8 300 mm×1 912 mm×2 230 mm
自走式	临沂瓦力机械设备有限公司 4YGZ-21 型果树振动采收机 ^[100]		匹配动力:双缸汽油机(16.4 kW) 采收果树直径:≤200 mm 激振振幅:≤20 mm 激振频率:8~12 Hz 外形尺寸:3 450 mm×1 000 mm×2 100 mm
	河北吉龙农业机械有限公司 4JG-350 型坚果收获机 ^[103]		匹配动力:YCD4T8-80B(59 kW) 采收果树直径:80~350 mm 工作效率:≥50 棵/h 外形尺寸:6 930 mm×1 930 mm×1 900 mm

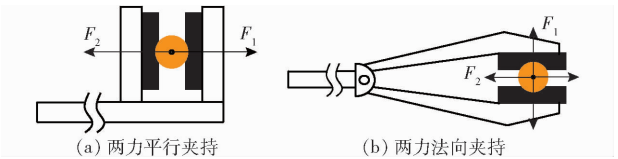


图 11 夹持装置示意图
Fig.11 Clamping device diagrams

便携式林果振摇采收机成本低、方便携带,适用于林果种植密集、大型机械无法进入工作的地块。但其夹持机构对树枝适应性差,容易造成树皮破损或树枝折断,人工操作劳动强度大。国外牵引式和自走式林果振摇采摘机外形尺寸大,国内林果种植

多采用矮化、密植的模式,机械作业空间小、条件差,因此国外机械不适合国内使用。
为减少装备设计研发周期,降低设计成本,国内一些研究学者采用 ANSYS、ADAMS 和 ABAQUS 等仿真软件对林果振动采收机中的采摘杆、偏心块和采摘夹手等关键部件进行模态分析^[106-107],得到其固有频率,避免工作时零件发生共振损坏。通过运动仿真,观察运动轨迹及运动速度、加速度变化,保证装备或部件工作过程运动平稳。采用静力学仿真,确保部件结构的刚度和强度满足工作要求。对各研究进行归纳总结,关键部件的虚拟仿真研究结论如表 6 所示。

表 6 关键部件虚拟仿真研究

Tab. 6 Application of rapid 3D reconstruction technology

虚拟仿真	研究对象	仿真结论	文献序号
模态分析	坚果采摘机采摘臂主臂	主臂前 5 阶振动分别为绕 Y 轴、绕 Z 轴、绕主轴、绕主轴扭转弯曲和绕 X 轴扭转	[108]
	核桃收获机激振装置偏心块	偏心块的固有频率为 1 626.1 ~ 5 072.6 Hz, 远大于系统产生的频率	[109]
运动仿真	油茶果采摘机采摘头连接臂	采摘头在 X、Z 方向运动加速度为 0.4 m/s ² 内震荡, 运动平稳	[110]
	果品振动采收机 5R 机构	机构末端输出位移 90 mm、最大速度 3.8 m/s 和最大加速度 350 m/s ²	[111]
其它仿真	核桃振动采摘机采摘夹手	采摘夹手的最大整体变形量、最大塑性变形量分别为 0.125、1.7 × 10 ⁻⁴ mm	[112]
	核桃采摘机-树干耦合模型	振动采摘过程树干质心位移平稳	[113]

2.2 接触式林果采摘机

接触式采收机多用于酿酒用葡萄、蓝莓和黑莓等^[114-116]藤本类果实的收获, 部分国家或地区也用于核桃、橄榄等坚果类果实的收获。接触式采收机按照机械化程度也可分为便携式、牵引式和自走式等形式, 典型机型及技术参数如表 7 所示。上述 3 种形式按照采摘头的工作方式可分为旋转式、往复

式或拍打式。其中便携式林果采收机多用于果树较高及对果皮机械破损要求不高的采摘作业, 如核桃、橄榄等。牵引式和自走式林果采收机一般体积较大, 采摘头(旋转分离器)为旋转梳刷式, 依靠旋转分离器上分布不同材质与数量的梳刷棒深入树冠内部与各分枝果实直接接触, 增加了机械向果树传递能量的位置, 减少了传递过程中的能量损耗。

表 7 接触式采收机

Tab. 7 Contact harvester

类别	机型	总体结构	技术参数
便携式	武汉艾克美农业科技有限公司 旋转梳刷式核桃采摘机 ^[117]		动力来源: 锂电池 额定电压: 12 V 额定功率: 0.084 kW 转速: 6 130 r/min 质量: 5 kg 外形尺寸: 2 500 mm × 380 mm × 255 mm
	济宁汇之鑫工矿机械有限公司 开合拍打式高空打果机 ^[118]		动力来源: 锂电池 额定电压: 12 V 额定功率: 0.104 kW 转速: 820 r/min 质量: 7.5 kg 外形尺寸: 2 170 mm × 170 mm × 280 mm
牵引式	美国 Littau Harvester 公司 SRX 型浆果收获机 ^[119]		匹配动力: 2.3 L 柴油发动机 旋转分离器: 垂直对称分布 行驶速度: 0 ~ 8 km/h 收获速度: 0.40 ~ 1.6 km/h
	波兰 JAGODA JPS Agromachines 公司 JAREK 5 型浆果收获机 ^[102]		配套拖拉机动力: ≥22 kW 旋转分离器: 倾斜平行分布 工作速度: 0.6 ~ 1.5 km/h 收获效率: 0.1 ~ 0.2 hm ² /h
自走式	中国农业机械化科学研究院 集团有限公司蓝莓收获机 ^[99]		匹配动力: 52 ~ 75 kW 旋转分离器: 垂直对称分布 工作速度: 0.5 ~ 2.0 km/h 收获效率: 0.20 ~ 0.34 hm ² /h
	波兰 JAGODA JPS Agromachines 公司 OSKAR 4WD 型浆果收获机 ^[102]		匹配动力: 55 kW 旋转分离器: 倾斜 V 型交错分布 工作速度: 0.5 ~ 2.0 km/h 收获效率: ≥0.5 hm ² /h

各种机型主要区分在于旋转分离器的不同。目前,旋转分离器主要有垂直滚筒刷式和具有倾角的双滚筒刷式,如图 12 所示。PETERSON 等^[120]通过对 V45(具有倾角的双滚筒刷式)蓝莓收获机与垂直滚筒刷式蓝莓采收机试验对比表明:V45 蓝莓收获机相较垂直滚筒刷式采收机能够减少 44% 的果实落地损失,且采收的蓝莓品质(坚实度、外观等)基本达到人工采收水平。

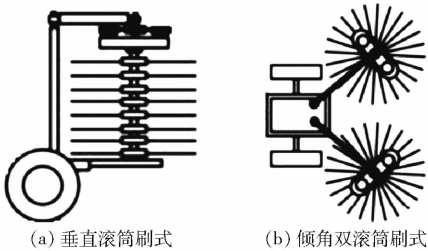


图 12 旋转分离器示意图

国外 Korvan、Littau Harvester 和 JAGODA JPS Agromachines 等公司具有较为完备的接触式林果采收装备与技术。其中,波兰 JAGODA JPS Agromachines 公司的浆果采收装备较为成熟,多种机型已应用于实际浆果采收作业。近些年,接触式蓝莓采收装备的研究受到国内越来越多的研究机构关注。东北林业大学针对蓝莓果实的识别、定位,蓝莓果树模型构建和采收机结构设计及采收机理进行了大量研究^[121-125],为我国蓝莓采收提供了很多技术手段和方法。中国农业机械化科学研究院集团有限公司研发了垂直双振滚筒刷蓝莓收获机,已完成样机设计与制造,正进行小范围田间试验。

2.3 撞击式林果采摘机

撞击式林果采收机通过施力元件提供的激励与果树某阶固有频率相近时,使果树产生振动响应,从而使果实快速脱离果树,主要用于带果柄一体收获的果实。PACHECO 等^[126]设计了一种基于弹簧力撞击的苹果收获机,撞击器结构组成如图 13 所示。其激励器的撞击速度可以达到 5.16 m/s,输出能量为 1151 J,可用于收获中等大小的苹果树。PETERSON 等^[127]开发了撞击式樱桃收获机,试验结果表明该收获机能够进行 Y 型樱桃树的收获,其收获率可以达到 1590 kg/h。PELLERIN 等^[128-129]针对苹果收获通过试验比较了撞击式和振摇式 2 种形式的林果采收机的工作性能,试验结果表明:撞击式采收机落果率为 94.7%,稍高于振摇式采收机落果率(93.6%)。

由于撞击头与果树间有距离碰撞,导致树干损伤严重,可能降低果树下一年结果率,因此对该形式的研究较少。后续可以开展撞击头工作形式、机械

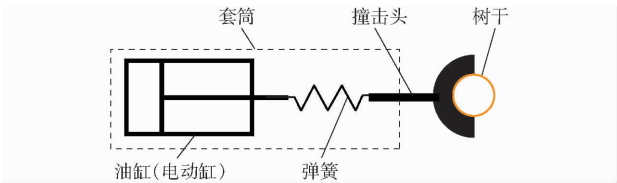


图 13 撞击器示意图

Fig. 13 Schematic of impactor

结构优化等方面的研究,实现撞击式采收机工作过程对果树的低损或无损伤。

3 面临的问题与发展建议

3.1 林果机械化采摘面临的主要问题

(1)林果采摘工况复杂,果园宜机化程度低。国内林果种类齐全,但果园多建于丘陵山地,林果采摘立地条件差,国外大型技术先进、性能可靠的林果机械采摘装备适应性差。国内林果栽培、管理等农艺与采摘装备融合度低、协同发展机制不健全,缺乏高标准、宜机化的林果全程机械化示范基地。

(2)林果采摘机械化程度低,末端执行器研究相对不足。便携式林果采摘装备因其质量轻、价格低廉,受到国内果农青睐,得到广泛应用,但其机械化程度低,采摘时需要人工手持高举作业,高温、长时间和高频率工作条件下,极易使操作者产生疲劳,甚至对其身体造成不同程度的伤害。另外,末端执行器是林果机械化采摘装备与果树或果实直接接触的部件,是造成接触部位损伤的重要因素之一,目前围绕其如何针对一机对一种林果采摘过程中降低损伤开展众多研究。我国林果种类多,末端执行器通用性差,仍无法满足一机多用同时满足低损伤的要求。

(3)系统性理论研究匮乏,关键技术研究进展缓慢。虽然国内提出林果机械化采摘多年,并进行许多研究工作,但采摘工作参数、果树果实力学特性及简化模型等基础性研究,土壤-机械-果树-果实互作关系,振动能量传递及脱落果运动方式、轨迹等未形成系统理论。导致林果机械化采摘时,装备与果树间常为刚性接触,装备工作参数与果树生物力学特性不匹配,对果树树干、树枝和树根造成不同程度的损伤,如接触位置树皮脱落、枝条折断和树根断裂等,严重时甚至导致果树死亡。另外,果实在激励作用下随枝条运动脱落过程中,相邻的果实间和果实与树枝间的碰撞不可避免,易造成果皮擦伤或撞伤,影响果实品质。

3.2 林果机械化采摘发展建议

未来人工智能、大数据等前沿科技为林果机械化采摘装备发展提供牵引力,林果采摘工作“无人

干”、“干不好”、“干不快”等产业需求为林果机械化采摘装备发展提供驱动力,多学科交叉融合人才创新团队合力攻关为林果机械化采摘发展提供支持力,乡村振兴、中国制造 2025 等国家战略为林果机械化采摘装备发展提供保障力,势必会推动林果机械化采摘装备的快速转变,使其朝着标准、高效、无损及智能的方向发展。为提升我国林果机械化采摘技术水平和国际竞争力,提出以下发展建议:

(1)推动林果采摘宜机化,形成“上下一体”产业链。因地制宜的制定果园标准化种植与管理模式,形成具有一定规模、按照一定标准栽培与管理的林果区,是推动林果机械化采摘甚至林果生产全程机械化的重要步骤。政府、科研院所、企业、果农联动,打通产业链条,合理制定林果机械化采收方案,建立林果生产全程机械化示范基地,解决林果采摘装备适应性差及性价比不高的问题,农机专业户或农机合作社开展专业林果机械化采摘服务以及广泛宣传使果农主动接受林果采摘装备。

(2)新兴技术融入林果采摘机械,实现采摘自动化、智能化。随着大数据、机器视觉等新兴技术的快速发展和林果采摘机械结构的日益成熟,在国外更加自动化、智能化的林果采摘机器被应用于实际生产,因此,国内应加紧攻关林果自动化与智能化采摘,突破复杂工况下的林果采摘机器人连续运动控

制、动态识别并快速决策等关键技术,实现自动导航、行走、识别、采摘和收集的林果采摘全环节自动化作业,以满足国内林果采摘自动化、智能化的发展需求。

(3)构建果树系统生物力学特性与末端执行器融合发展系统思路。林果机械化采摘装备的研发过程中,应综合考虑果树系统生物力学特性、种植模式等农艺,设计具有针对性的末端执行器。同时,同一林果机械化采摘装备面向不同果树采摘作业时,应对各果树不同生物力学特性和种植模式进行数据采集与分析,构建末端执行器柔性包裹接触面积和驱动力的调控策略,以此实现末端执行器面向不同采摘对象间的通用性,同时也减少对果树接触部位的损伤。

(4)强化林果采摘理论系统性研究,突破关键技术封锁。系统分析林果机械化采摘工作过程,优化采摘机械结构与工作参数,探明果树果实机械损伤的原因,确保机械采摘质量。探究果树果实动力学特性与土壤-机械-果树-果实互作机理,以及完善振动能量传递与果实运动规律,进一步提高采摘效率。构建落果率、损伤率、动力消耗和劳动力成本等因素的林果机械化采摘经济效益模型,探索更多可行的林果机械化采摘方式,对于林果产业的发展具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 苑严伟,白圣贺,牛康,等. 林果机械化采收技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 53 – 63.
YUAN Yanwei, BAI Shenghe, NIU Kang, et al. Research progress on mechanized harvesting technology and equipment for forest fruit[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(9): 53 – 63. (in Chinese)

[2] 寇欣,王东,周建波,等. 国内林果采摘设备研究现状分析[J]. 林业机械与木工设备, 2022, 50(6): 15 – 21.
KOU Xin, WANG Dong, ZHOU Jianbo, et al. Analysis of research status of domestic forest fruit picking equipment[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2022, 50(6): 15 – 21. (in Chinese)

[3] 祝前峰,陆荣鉴,刘彬,等. 核桃采摘机械研究现状与发展趋势[J]. 林业和草原机械, 2021, 2(1): 45 – 53.
ZHU Qianfeng, LU Rongjian, LIU Bin, et al. Research status and development trend of walnut picking machinery[J]. Forestry and Grassland Machinery, 2021, 2(1): 45 – 53. (in Chinese)

[4] 苑进. 选择性收获机器人技术研究进展与分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 1 – 17.
YUAN Jin. Research progress analysis of robotics selective harvesting technologies[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 1 – 17. (in Chinese)

[5] TOMBESI S, PONI S, PALLIOTTI A, et al. Mechanical vibration transmission and harvesting effectiveness is affected by the presence of branch suckers in olive trees[J]. Biosystems Engineering, 2017, 158: 1 – 9.

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

[7] BECHAR A, VIGNEAULT C. Agricultural robots for field operations: concepts and components[J]. Biosystems Engineering, 2016, 149: 94 – 111.

[8] 刘然,吴昊,汤晶宇,等. 林果采摘机器人视觉系统研究进展[J]. 林业机械与木工设备, 2022, 50(12): 14 – 17, 27.
LIU Ran, WU Hao, TANG Jingyu, et al. Research advance on vision system of forest fruit picking robot[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2022, 50(12): 14 – 17, 27. (in Chinese)

[9] 王毅,付舜,张哲,等. 柑橘采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(1): 69 – 77.
WANG Yi, FU Shun, ZHANG Zhe, et al. Design and experiment of clamping mechanism about end-effector for citrus harvesting robot[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(1): 69 – 77. (in Chinese)

[10] 刘晓雯, 郭彩玲. 基于振动采摘的苹果树枝干动力学特性[J]. 林业工程学报, 2021, 6(3): 120 – 126.
LIU Xiaowen, GUO Cailing. Study on dynamic characteristics of apple tree branches based on vibration picking[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(3): 120 – 126. (in Chinese)

[11] PETERSON D L. Harvest mechanization progress and prospects for fresh market quality deciduous tree fruits[J]. Hort Technology, 2005, 15(1): 72 – 75.

[12] WANG Z, XUN Y, WANG Y, et al. Review of smart robots for fruit and vegetable picking in agriculture[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2022, 15(1): 33 – 54.

[13] ZHANG B H, XIE Y X, ZHOU J, et al. State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 177(1): 105694.

[14] 孙景彬, 刘志杰, 杨福增, 等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 1 – 18.
SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1 – 18. (in Chinese)

[15] 陈燕, 蒋志林, 李嘉威, 等. 夹剪一体的荔枝采摘末端执行器设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 35 – 41.
CHEN Yan, JIANG Zhilin, LI Jiawei, et al. Design and testing of litchi picking end-effector integrated clamping and cutting performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 35 – 41. (in Chinese)

[16] 王毅, 许洪斌, 张茂, 等. 仿蛇嘴咬合式柑橘采摘末端执行器设计与实验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 54 – 64.
WANG Yi, XU Hongbin, ZHANG Mao, et al. Design and experiment of bite-model end-effector for citrus harvesting by simulating with mouth of snake[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 54 – 64. (in Chinese)

[17] 刘成良, 贡亮, 苑进, 等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 1 – 22, 55.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 1 – 22, 55. (in Chinese)

[18] 肖珂, 夏伟光, 梁聪哲. 复杂背景下果园视觉导航路径提取算法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 197 – 204, 252.
XIAO Ke, XIA Weiguang, LIANG Congzhe. Visual navigation path extraction algorithm in orchard under complex background[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 197 – 204, 252. (in Chinese)

[19] ERDOĞAN D, GÜNER M, DURSUN E, et al. Mechanical harvesting of apricots[J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(1): 19 – 28.

[20] 沈瑞珍, 张晓文. 银杏侧枝振动落果的试验研究[J]. 林业科学, 1997(2): 81 – 87.
SHEN Ruizhen, ZHANG Xiaowen. The research on the dislodging of fruits by vibration with the branches of ginkgo bilobal[J]. Scientia Science, 1997(2): 81 – 87. (in Chinese)

[21] POLAT R, GEZER I, GUNER M, et al. Mechanical harvesting of pistachio nuts[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(4): 1131 – 1135.

[22] SESSIZ A, ÖZCAN M T. Olive removal with pneumatic branch shaker and abscission chemical[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(2): 148 – 153.

[23] SAFDARI A, GHASSEMZADEH H, ABDOLLAHPOUR S, et al. Design construction and evaluation of a portable limb shaker for almond tree[J]. Australian Journal of Agricultural Engineering, 2010, 1(5): 179 – 183.

[24] TORREGROSA A, ORTÍ E, MARTÍN B, et al. Mechanical harvesting of oranges and mandarins in Spain[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(1): 18 – 24.

[25] BLANCO-ROLDÁN G L, GIL-RIBES J A, KOURABA K, et al. Effects of trunk shaker duration and repetitions on removal efficiency for the harvesting of oil olives[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(3): 329 – 334.

[26] ORTIZ C, TORREGROSA A. Determining adequate vibration frequency, amplitude, and time for mechanical harvesting of fresh mandarins[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(1): 15 – 22.

[27] 杨会民, 散望龙, 陈毅飞, 等. 不同振动特性参数对杏树振动响应的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 10 – 16.
YANG Huimin, SAN Yunlong, CHEN Yifei, et al. Influence of different vibration characteristic parameters on vibration response of apricot trees[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2): 10 – 16. (in Chinese)

[28] MIM F S, GALIB S M, HASAN M F, et al. Automatic detection of mango ripening stages: an application of information technology to botany[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 237: 156 – 163.

[29] 陈锋军, 张新伟, 朱学岩, 等. 基于改进 EfficientDet 的油橄榄果实成熟度检测[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 158 – 166.
CHEN Fengjun, ZHANG Xinwei, ZHU Xueyan, et al. Detection of the olive fruit maturity based on improved EfficientDet[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(13): 158 – 166. (in Chinese)

[30] 黎丽莎, 刘燕德, 胡军, 等. 近红外无损检测技术在水果成熟度判别中的应用研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(6): 95 – 105.

- LI Lisha, LIU Yande, HU Jun, et al. Application of near infrared nondestructive testing technology in fruit maturity discrimination[J]. Journal of East Jiaotong University, 2021, 38(6): 95–105. (in Chinese)
- [31] 散黎龙, 刘旋峰, 牛长河, 等. 杏果实成熟度特性参数与果柄分离力的相关性分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 62–68.
- SAN Yunlong, LIU Xuanfeng, NIU Changhe, et al. Relativity analysis between characteristic parameters of apricot's ripeness and its fruit removal force[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 62–68. (in Chinese)
- [32] 韩元顺, 许林云, 周杰, 等. 板栗树振动响应特性与落果情况试验研究[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(3): 599–613.
- HAN Yuanshun, XU Linyun, ZHOU Jie, et al. Experimental study on vibration response and fruit dropping of chestnut tree [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34(3): 599–613. (in Chinese)
- [33] 高团结. 果园核桃机械化采收装置的设计与研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2014.
- GAO Tuanjie. Design and study the equipment of orchard walnut mechanical harvesting[D]. Shihezi: Shihezi University, 2014. (in Chinese)
- [34] 王长勤, 许林云, 周宏平, 等. 偏心式林果振动采收机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 10–16.
- WANG Changqin, XU Linyun, ZHOU Hongping, et al. Development and experiment of eccentric-type vibratory harvester for forest-fruits[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 10–16. (in Chinese)
- [35] WHITNEY J D, SMERAGE G H, BLOCK W A. Dynamic analysis of a trunk shaker-post system[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(4): 1066–1070.
- [36] 散黎龙, 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)
- [37] 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 Kenan, WU Chuanyu. Vibratory harvesting mechanism for tree fruit based on epitrochoid[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 59–66. (in Chinese)
- [38] 李松涛. 基于旋轮线轨迹的果品振动采收机构设计与优化[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.
- LI Songtao. Design and optimization of fruit vibration harvesting mechanism based on epitrochoid[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019. (in Chinese)
- [39] 倪柯楠. 基于外旋轮线轨迹的果品振动采收机构设计与分析[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015.
- NI Kenan. Design and analysis on vibration harvesting mechanism for fruit based on epitrochoid[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2015. (in Chinese)
- [40] 林欢, 许林云, 宣言, 等. 基于有限元的多级 Y 型银杏树模态分析与试验[J]. 林业工程学报, 2020, 5(1): 148–155.
- LIN Huan, XU Linyun, XUAN Yan, et al. Modal analysis and experimental study of the multistage Y-type ginkgo tree using the finite element method[J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(1): 148–155. (in Chinese)
- [41] 王冬, 陈度, 王书茂, 等. 基于有限元方法的整形果树振动收获机理分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊1): 56–62.
- WANG Dong, CHEN Du, WANG Shumao, et al. Analysis on vibratory harvesting mechanism for trained fruit tree based on finite element method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 56–62. (in Chinese)
- [42] 魏娟, 闫豪, 李莹, 等. 基于有限元的机械收获开心果的动力学分析[J]. 制造业自动化, 2019, 41(10): 20–25.
- WEI Juan, YAN Hao, LI Ying, et al. Analysis on dynamic characteristics of mechanical harvesting for pistachio on finite element method[J]. Manufacturing Automation, 2019, 41(10): 20–25. (in Chinese)
- [43] 别云波. 振动式核桃收获机振动装置的设计与研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2020.
- BIE Yunbo. Vibration device of vibrating walnut harvester design and research [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [44] BENTAHER H, HADDAR M, FAKHFAKH T, et al. Finite elements modeling of olive tree mechanical harvesting using different shakers[J]. Trees, 2013, 27(6): 1537–1545.
- [45] 赵孟娇, 董一超, 王玉彬, 等. 基于图像的果树三维结构重建研究[J]. 信息技术与信息化, 2020(2): 133–136.
- ZHAO Mengjiao, DONG Yichao, WANG Yubin, et al. Research on 3D structure reconstruction of fruit trees based on image [J]. Information Technology and Informatization, 2020(2): 133–136. (in Chinese)
- [46] 熊龙烨, 王卓, 何宇, 等. 果树重建与果实识别方法在采摘场景中的应用[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(8): 153–156.
- XIONG Longye, WANG Zhuo, HE Yu, et al. Application of fruit tree reconstruction and fruit recognition method in picking scene[J]. Transducers and Microsystem Technologies, 2019, 38(8): 153–156. (in Chinese)
- [47] 蔡健荣, 孙海波, 李永平, 等. 基于双目立体视觉的果树三维信息获取与重构[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 152–156.
- CAI Jianrong, SUN Haibo, LI Yongping, et al. Fruit trees 3D information perception and reconstruction based on binocular stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 152–156. (in Chinese)
- [48] 麦春艳, 郑立华, 孙红, 等. 基于 RGB-D 相机的果树三维重构与果实识别定位[J]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 35–40.
- MAI Chunyan, ZHENG Lihua, SUN Hong, et al. Research on 3D reconstruction of fruit tree and fruit recognition and location

- method based on RGB-D camera[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 35-40. (in Chinese)
- [49] 贺磊盈, 武传宇, 杜小强. 基于双轮廓同步跟踪的果树枝干提取及三维重建[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 182-189. HE Leiying, WU Chuanyu, DU Xiaoqiang. Fruit tree extraction based on simultaneous tracking of two edges for 3D reconstruction[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 182-189. (in Chinese)
- [50] NIELSEN M, SLAUGHTER D, GLIEVER C. Vision-based 3D peach tree reconstruction for automated blossom thinning[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(1): 188-196.
- [51] 吴升, 赵春江, 郭新宇, 等. 基于点云的果树冠层叶片重建方法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊1): 212-218. WU Sheng, ZHAO Chunjiang, GUO Xinyu, et al. Method of fruit tree canopy leaf reconstruction based on point cloud[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp.1): 212-218. (in Chinese)
- [52] YUN T, LI W, SUN Y, et al. Leaf model reconstruction and mechanical deformation based on laser point cloud[J]. International Journal Bioautomation, 2014, 18(3): 265-280.
- [53] 任栋宇, 李晓娟, 林涛, 等. 基于 Kinect v2 传感器的果树枝干三维重建方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2): 197-203. REN Dongyu, LI Xiaojuan, LIN Tao, et al. 3D reconstruction method for fruit tree branches based on Kinect v2 sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.2): 197-203. (in Chinese)
- [54] 俞龙, 洪添胜, 赵喜喜, 等. 基于超声波的果树冠层三维重构与体积测量[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 204-208. YU Long, HONG Tiansheng, ZHAO Zuoxi, et al. 3D-reconstruction and volume measurement of fruit tree canopy based on ultrasonic sensors[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 204-208. (in Chinese)
- [55] 贺磊盈. 面向振动采收的果树枝干三维重建方法及其动力学特性研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014. HE Leiying. Researches on 3D reconstruction of fruit tree's trunk and its dynamic characteristics for vibratory harvesting[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014. (in Chinese)
- [56] TENG C H, CHEN Y S, HSU W H. Constructing a 3D trunk model from two images[J]. Graphical Models, 2007, 69(1): 33-56.
- [57] TENG C H, CHEN Y S. Image-based tree modeling from a few images with very narrow viewing range[J]. The Visual Computer, 2009, 25(4): 297-307.
- [58] TAN P, ZENG G, WANG J D, et al. Image-based tree modeling[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 87.
- [59] HUANG H, MAYER H. Extraction of 3D unfoliated trees from image sequences via a generative statistical approach[C]// Dagm Conference on Pattern Recognition, 2007.
- [60] 孔繁栋. 苹果采摘环境的多目标识别及三维重构[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019. KONG Fandong. Multi-objective recognition and 3D reconstruction in apple picking environment[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019. (in Chinese)
- [61] CHAU W Y, CHENG N L, WANG Y H, et al. Understanding the dynamic properties of trees using the motions constructed from multi-beam flash light detection and ranging measurements[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2022, 193: 19.
- [62] SINOQUET H, RIVET P, GODIN C. Assessment of the three-dimensional architecture of walnut trees using digitising[J]. Silva Fennica, 1997, 31(3): 265-273.
- [63] HORVATH E, SITKEI G. Damping properties of plum trees shaken at their trunks[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(1): 19-25.
- [64] LÁNG Z. A one degree of freedom damped fruit tree model[J]. Transactions of the ASAE, 2008, 51(3): 823-829.
- [65] HORVATH E, SITKEI G. Energy consumption of selected tree shakers under different operational conditions[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 80(2): 191-199.
- [66] LÁNG Z, CSORBA L. A two degree of freedom damped fruit tree model[J]. Agric. Eng. Int.: the CIGR Journal, 2015, 17(3): 335-341.
- [67] VILLIBOR G P, SANTOS F L, QUEROIROZ D M, et al. Dynamic behavior of coffee fruit-stem system using modeling of flexible bodies[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 105009.
- [68] 林欢, 许林云, 宣言, 等. 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, 2020, 5(3): 121-129. LIN Huan, XU Linyun, XUAN Yan, et al. Kinetic modeling and experiment of multistage Y-shaped ginkgo tree based on physical rod[J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(3): 121-129. (in Chinese)
- [69] 林欢, 许林云, 宣言, 等. 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, 2019, 40(11): 81-88. LIN Huan, XU Linyun, XUAN Yan, et al. Study on kinetic modeling of ginkgo tree based on concentrated mass[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(11): 81-88. (in Chinese)
- [70] 王亚磊, 陈云, 韩冰, 等. 基于高速摄像技术枸杞振动采收运动规律的研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(11): 166-170. WANG Yalei, CHEN Yun, HAN Bing, et al. Research on the law of wolfberry dropping based on high-speed camera[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11): 166-170. (in Chinese)
- [71] ZHOU J F, HE L, KARKEE M, et al. Analysis of shaking-induced cherry fruit motion and damage[J]. Biosystems

Engineering, 2016, 144: 105 – 114.

- [72] 蔡菲, 王春耀, 王学农, 等. 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), 2013, 41(4): 208 – 212.
CAI Fei, WANG Chunyao, WANG Xuenong, et al. Inertia force of fruits abscised by vibration based on high speed video camera technology[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(4): 208 – 212. (in Chinese)
- [73] 吕梦璐, 王春耀, 蔡菲, 等. 杏果实振动采收速度规律的研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(6): 169 – 172.
LÜ Menglu, WANG Chunyao, CAI Fei, et al. The laws of the velocity of apricot the vibration harvest to research[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(6): 169 – 172. (in Chinese)
- [74] 散鋈龙, 杨会民, 王学农, 等. 振动收获过程中杏果实脱落的动态响应[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)
- [75] 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 shedding characteristics by vibration using high-speed videos[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(3): 133 – 141. (in Chinese)
- [76] CASTILLO-RUIZ F J, TOMBESI S, FARINELLI D. Tracking olive fruit movement and twisting during the harvesting process using video analysis[J]. Acta Horticulturae, 2018, 1199: 409 – 414.
- [77] TORREGROSA A, ALBERT F, ALEIXOS N, et al. Analysis of the detachment of citrus fruits by vibration using artificial vision[J]. Biosystems Engineering, 2014, 119: 1 – 12.
- [78] PRAEGER U, SURDILOVIC J, TRUPPEL I, et al. Comparison of electronic fruits for impact detection on a laboratory scale [J]. Sensors, 2013, 13(6): 7140 – 7155.
- [79] RIDER R C, FRIDLEY R B, O'BRIEN M. Elastic behavior of a pseudo-fruit for determining bruise damage to fruit during mechanized handling[J]. Transaction of the ASAE, 1973, 16(2): 241 – 244.
- [80] 唐善奇. 葡萄采摘的果穗振动耦合仿真和末端执行器设计及试验[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
TANG Shanqi. Clusters' vibration coupling simulation and end effector design & testing for grape picking[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [81] OPARA U L, PATHARE P B. Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce: a review [J]. Postharvest Biology & Technology, 2014, 91(5): 9 – 24.
- [82] SCHULTE N L, BROWN G K, TIMM E J. Apple impact damage thresholds[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1992, 8(1): 55 – 60.
- [83] YU P, LI C, RAINS G, et al. Development of the berry impact recording device sensing system: hardware design and calibration[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2011, 79(2): 103 – 111.
- [84] 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)
- [85] HEROLD B, TRUPPEL I, SIERING G, et al. A pressure measuring sphere for monitoring handling of fruit and vegetables [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1996, 15(1): 73 – 88.
- [86] PRAEGER U, SURDILOVIC J, TRUPPEL I, et al. Comparison of electronic fruits for impact detection on a laboratory scale [J]. Sensors, 2013, 13(6): 7140 – 7155.
- [87] ZHANG S, WANG W, WANG Y, et al. Improved prediction of litchi impact characteristics with an energy dissipation model [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 176: 111508.
- [88] 李斌, 陆华忠, 吕恩利, 等. 荔枝树枝能量传递特性与去梗式振动采摘作业参数[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 18 – 25.
LI Bin, LU Huazhong, LÜ Enli, et al. Characterizing energy transfer of litchi branches and working parameters of destemmed vibrational picking[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(8): 18 – 25. (in Chinese)
- [89] SOLA-GUIRADO R R, BERNARDI B, CASTRO-GARCIA S, et al. Assessment of aerial and underground vibration transmission in mechanically trunk shaken olive trees[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 49(3): 191 – 197.
- [90] 耿雷. 基于刚柔耦合动力学分析的蓝莓采摘机理与影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
GENG Lei. Research on blueberry picking mechanism and influencing factors based on dynamic analysis of rigid-flexible coupling[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [91] 伍德林, 赵恩龙, 姜山, 等. 基于能量传递规律的油茶树冠层振动参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 23 – 33.
WU Delin, ZHAO Enlong, JIANG Shan, et al. Optimization and experiment of canopy vibration parameters of *Camellia oleifera* based on energy transfer characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53

- (8): 23–33. (in Chinese)
- [92] DU X, CHEN D, ZGANG Q, et al. Dynamic responses of sweet cherry trees under vibratory excitations[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(3): 305–314.
- [93] 瞿维, 王春耀, 王学农, 等. 受迫振动下杏果实树枝能量传递初探[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(7): 223–227.
- QU Wei, WANG Chunyao, WANG Xuenong, et al. Energy transfer of apricot fruit branch under forced vibration[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2014, 42(7): 223–227. (in Chinese)
- [94] HOMAYOUNI T, GHOLAMI A, TOUDESHEKI A, et al. Estimation of proper shaking parameters for pistachio trees based on their trunk size[J]. Biosystems Engineering, 2022, 216: 121–131.
- [95] 崔文哲, 徐道春, 李文彬, 等. 无患子果树不同激振条件下的振动响应特性研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 287–291.
- CUI Wenzhe, XU Daochun, LI Wenbin, et al. Vibration response characteristics of *Sapindus mukorossi* tree under different excitations[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 287–291. (in Chinese)
- [96] 王长勤. 偏心式林果振动采收机的设计及试验研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- WANG Changqin. Design and experimental study of eccentric-type forest fruit vibratory harvester[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012. (in Chinese)
- [97] 刘梦飞. 核桃采摘机的设计与试验[D]. 咸阳: 陕西科技大学, 2015.
- LIU Mengfei. Walnut picking machine design and experiment[D]. Xianyang: Shaanxi University of Science & Technology, 2015. (in Chinese)
- [98] 曹成茂, 詹超, 孙燕, 等. 便携式山核桃高空拍打采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 130–137.
- CAO Chengmao, ZHAN Chao, SUN Yan, et al. Design and experiment of portable walnut high-altitude pat-picking machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 130–137. (in Chinese)
- [99] 中国农业机械化科学研究院集团有限公司[EB/OL]. [2023–03–01]. <http://www.caams.org.cn/>.
- [100] 临沂瓦力机械设备有限公司[EB/OL]. [2023–03–01]. <https://www.walijixie.cn/>.
- [101] SICMA S. p. A[EB/OL]. [2023–03–01]. <https://www.sicma.it/eng/>.
- [102] JAGODA JPS Agromachines[EB/OL]. [2023–03–01]. <http://www.jagoda.com.pl>.
- [103] 河北吉龙农业机械有限公司[EB/OL]. [2023–03–01]. <http://www.jilongtech.cn/jgshj>.
- [104] 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)
- [105] 朱惠斌, 张文锴, 曹科高, 等. 云南山地核桃振动采摘机的设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(2): 130–139.
- ZHU Huibin, ZHANG Wenkai, CAO Kegao, et al. Design and experiment of walnut vibration picker in Yunnan mountain[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(2): 130–139. (in Chinese)
- [106] 詹超. 山核桃采摘机的结构设计与研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.
- ZHAN Chao. Structural design and research of *Carya cathayensis* picking machine[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [107] 吴问天. 油茶果采摘机的关键部件设计与试验[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- WU Wentian. The design and test of key components of *Camellia oleifera* picking machine[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [108] 蔡颂, 李立君, 高自成. 基于 Pro/ENGINEER 坚果采摘臂的建模及运动仿真分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(4): 139–143.
- CAI Song, LI Lijun, GAO Zicheng. Modeling and motion simulation analysis based on Pro/ENGINEER nut picking arm[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(4): 139–143. (in Chinese)
- [109] 邹志勇, 别云波, 王琪, 等. 基于 Solidworks 建模及有限元分析的核桃收获机的仿真设计[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(5): 616–622.
- ZOU Zhiyong, BIE Yunbo, WANG Qi, et al. Simulation design of walnut harvester based on Solidworks modeling and finite element analysis[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2020, 46(5): 616–622. (in Chinese)
- [110] 徐国安. 固根摇枝式油茶果采摘装置的设计与试验[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
- XU Guoan. Design and test of a camellia fruit picking machine picked by holding the roots and shaking the branches[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [111] 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)
- [112] 尹逊春. 振动式核桃采摘机的设计与优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020.
- YIN Xunchun. Design and optimization of vibrating walnut picker[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2020. (in

Chinese)

- [113] 逯泽鹏. 振动式核桃采摘机虚拟样机设计及动力学仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2022.
LU Zepeng. Design and dynamic simulation of vibratory walnut picker virtual prototype[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2022. (in Chinese)
- [114] PEZZI F, CAPRARA C. Mechanical grape harvesting: investigation of the transmission of vibrations[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(3): 281–286.
- [115] 王虹虹, 倪晓宇, 李维林, 等. 蓝莓机械采收技术研究现状及发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2020, 48(7): 4–8.
WANG Honghong, NI Xiaoyu, LI Weilin, et al. Research status and development trend of blueberry harvesting technology[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2020, 48(7): 4–8. (in Chinese)
- [116] PETERSON D L, TAKEDA F, KORNECKI T. Harvester for “T”, “V”, and “Y” trellised eastern thornless blackberries[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1992, 8(1): 9–12.
- [117] 武汉艾克美农业科技有限公司[EB/OL]. [2023–03–01]. <http://www.acmeagro.org>.
- [118] 济宁汇之鑫工矿机械有限公司[EB/OL]. [2023–03–01]. <https://hzx0310.d17.cc/>.
- [119] Littau Harvester[EB/OL]. [2023–03–01]. <https://littauhvester.com/>.
- [120] PETERSON D L, WOLFORD S D, TIMM E J, et al. Fresh market quality blueberry harvester[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(3): 535–540.
- [121] 王海滨. 蓝莓植株多自由度系统振动建模及仿真研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
WANG Haibin. Modeling of blueberry plants vibration in multi degree of freedom system and the simulation study[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014. (in Chinese)
- [122] 鲍玉冬. 机械采收蓝莓振动特性及数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
BAO Yudong. Research on vibration characteristics and numerical simulation of blueberry mechanization harvesting[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015. (in Chinese)
- [123] 王海滨, 李志鹏, 姜雪松, 等. 基于槽型凸轮传动的蓝莓采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 80–91.
WANG Haibin, LI Zhipeng, JIANG Xuesong, et al. Design and experiment on blueberry picking machine based on groove cam drive[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 80–91. (in Chinese)
- [124] 聂宏宇. 蓝莓植株机械采摘振动特性研究与采摘实验台的设计[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
NIE Hongyu. Research on mechanical picking vibration characteristics of blueberry plants and design of picking experiment bench[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020. (in Chinese)
- [125] 李健, 张皓瑜, 郭艳玲, 等. 自走式蓝莓采摘机行走液压系统的设计与仿真[J]. 机床与液压, 2022, 50(23): 88–92.
LI Jian, ZHANG Haoyu, GUO Yanling, et al. Design and simulation of walking hydraulic system of self-propelled blueberry harvester[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(23): 88–92. (in Chinese)
- [126] PACHECO A, REHKUGLER G E. Design and development of a spring activated impact shaker for apple harvesting[J]. Transactions of the ASAE, 1980, 23(4): 826–830.
- [127] PETERSON D L, WHITING M D, WOLFORD S D. Fresh-market quality tree fruit harvester, Part I: sweet cherry[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003, 19(5): 539–543.
- [128] PELLERIN R A, MILLIER W F, LASKO A N, et al. Apple harvesting with an inertial vs. impulse trunk shaker on open-center and central-leader trees, Part I[J]. Transactions of the ASAE, 1978, 21(3): 407–413.
- [129] PELLERIN R A, MILLIER W F, LASKO A N, et al. Apple harvesting with an inertial vs. impulse trunk shaker on open-center and central-leader trees, Part II[J]. Transactions of the ASAE, 1979, 22(5): 983–988.