

核桃振动采收技术及理论研究现状

朱彦澄^[1] 周宏平^[2] 许林云^[3] 张洋^[4]

(南京林业大学 南京 210000)

摘 要: 核桃是我国林果的重要一环, 随着我国对坚果类需求的不断扩大, 目前以人工采收为主的采收方式无法满足日渐增长的需求, 采用更高效的机械化采收代替人工是必然趋势。国内外学者对次都已经进行了较多研究。本文主要介绍了适用于我国不同核桃种植方式的振动采收机械, 分析了在振动采收过程中的几个主要影响因素, 并从林果振动采收机理、建立动力学模型、加速度传感器和基于高速摄像仪的果实运动实验三个方面阐述了国内外林果采收机械的理论研究现状, 总结研究中存在的不足, 并对我国未来核桃振动采收的研究方向进行了讨论。

关键词: 核桃, 振动采收, 林业机械, 高速摄影仪, 动力学特性

The current status of mechanical and theoretical research on orchard fruit vibration harvesting machines

Zhuyancheng^[1] Zhouhongping^[2] Xulinyun^[3] Zhayang^[4]

(Nanjing Forestry University Nanjing 210000)

Abstract: Walnuts are an important part of China's forestry and fruit industry. With the continuous expansion of demand for nuts, the current harvesting method mainly based on manual harvesting cannot meet the growing demand. Therefore, adopting more efficient mechanized harvesting instead of manual harvesting is an inevitable trend. Scholars both domestically and internationally have conducted extensive research on this topic. This article mainly introduces the vibration harvesting machinery suitable for different walnut planting methods in China, analyzes several main influencing factors in the vibration harvesting process, and elaborates on the theoretical research status of forest fruit harvesting machinery at home and abroad from three aspects: the mechanism of forest fruit vibration harvesting, the establishment of dynamic models, and fruit movement experiments based on high-speed cameras. The shortcomings in the research are summarized, and the future research directions of walnut vibration harvesting in China are discussed.

Keywords: Walnut, vibration harvesting, forestry machinery, high-speed camera, dynamic characteristics

林果产业是我国林业经济的重要组成部分之一, 能够在实现经济产值的同时, 存在较高的生态效益, 核桃又是林果产业中的重要一环。《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^[1], 其中核桃的产量达到 593.46 万吨, 占据了林业作物经济产值的半壁江山。我国核桃种植面积的不断扩大, 也为核桃采收的机械化发展提供了契机。目前我国核桃种植方式大多是低矮密植为主, 树与树之间空隙较小, 不方便大型机械作业, 所以目前仍然是以人工进行采收为主。但随着人力成本的不断提高, 此种采收方式以逐渐无法满足日渐增加的核桃产量的需求。在新疆、甘肃等实行大面积规模化种植的地区, 已经开始采用机械化的方式进行采收, 且主要以振动采收为主^[2]。但整体机械化程度仍保持在一个较低的水准, 在进行振动采收时也会对核桃树本身会产生一定影响, 因此针对振动式核桃采收机械进行理论化的研究, 有利于提高振动采收技术水平, 为核桃产业进一步发发展提供助力。

1 核桃种植方式及相应采收机构发展现状

1.1 低矮密集化种植

在我国的华中区、西南区和西北区等地区，目前核桃种植还是以低矮密植种植为主，这些地区大多充斥着丘陵和山地。目前国内外采收装置大多是以车载式为主，适用于密度较低、种植间隙较大的果园，且造价昂贵，经济成本高，不适用于此类地区。为了针对此类区域的林果采收，国内研究人员开展了相关研发并制造出一系列可单人背负的小型采收机。

为了实验能够便捷采收，且满足机械小型化的需求，闫锋欣等人^[3]设计出了一款可手持的采收机，在使用时将机器用肩膀抗住，用一只手固定住机器，另一只手控制机器的启停，并对机器的振动频率进行调节。在对油茶果进行采摘时，将采摘头对准需要采摘的果树，从上到下进行拍打采收。在采收过程中，由两侧的梳刷头对枝上的油茶果产生冲击振动，使得油茶果做受迫运动并产生摆动。当摆动时所产生的惯性力大于果实的果柄结合力时，果实便会从果柄上掉落^[4]。这种类型的单人式采收机，体积较小质量较轻，能够满足在狭窄空间内作业，且能够达到较好的落果率，具有很强的实用性。

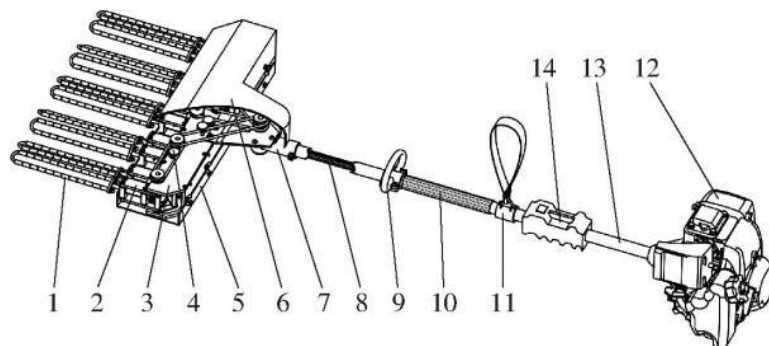


图1 手持冲击梳刷式的油茶果采收机

1.冲击指 2.指座 3.机架 4.带传动系统 5.底壳 6.上罩壳 7.连接头

8.花键轴 9.握把 10.限位橡胶套 11.肩带 12.汽油机 13.手持杆 14.启停开关

吴永金等人^[5]设计了一款手持背负式林果采摘机（图2）。在正式开始采收前，先依据果树相关参数及纸条的粗细调节频率，目测果实的具体位置，调节采收机械臂长度，利用采收机采收头处的钩杆钩住果柄，利用锯片摩擦果柄将其切断，果实就会顺着软管掉入采收机内，最后经柔性软管进入果实储存箱内部，

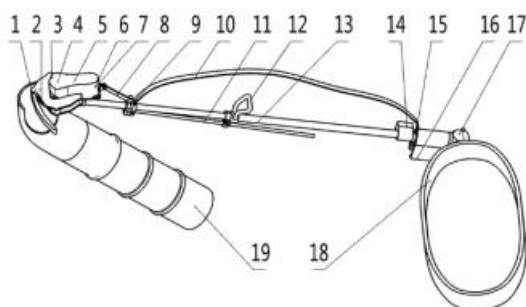


图2 手持背负式水果采摘机结构组成

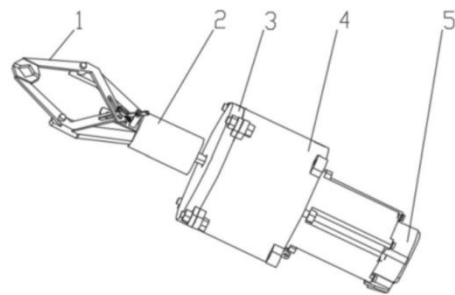
1.钩杆 2.锯片 3.机壳 4.皮带轮 5.同步带 6.电机 7.电机机壳

8.连杆 9.滑块 10.背带 11.拉杆 12.手柄 13.伸缩杆 14.舵机调速仪

15.电调 16.电池 17.万向轴承 18.腰带 19.伸缩软管

许林云、刘冠华等^[6]人针对目前大部分林果采收装置适用于大面积、规模化果品生产，而小型林果采收更加注重果实采收的品质的问题设计了一种小型振动采收装置。主要由夹持装置和激振装置两部分组成（如图3）。工作时夹持装置夹持结果树枝；激振装置产生激振运动，通过激振装置中的推杆与夹持装置之间的刚性连接，带动夹持装置产生振动，实现振动刚采收；整个机器结构简单，环境适应性强，易于操作。

本设计通过凸轮激振的方式进行振动，可以减少装置的质量和体积，使其更加易于携带，整体机构能够适应较狭窄的采收空间，且使用简单易上手，便于果农使用，采摘过程中不伤果实，使采摘下来的果实具有较高的品质。



1. 夹持头 2. 夹持机架 3. 外壳盖板 4. 凸轮直线运动机构 5. 电机

图 3 小型振动采收装置

以上背负式采收机均可以满足低矮密植形地区的采摘需求，能够由担任背负进入且造价成本较低，具有较好的应用空间，且目前其正在往无人化、机电一体化等方向发展。

1.2 标准果园化种植

在我国西北等地区拥有大片的土地可以进行核桃种植，在这些地区的核桃常常采用标准化的果园式种植，在这种种植模式下，果树与果树之间有足够的空间可以给中大型采收机械发挥的空间。

应用于标准化果园种植的采收机械是目前国内外学者的重点研究方向之一，各个高校及科研院所、企业都在类产品上做了大量研究并研发出了较多的产品。

表 1 振动式采收机

类别	生 产商	产 品型 号	图片	相关参数	采收 对象
牵引式	意大利 SICM A S.p. A.公司 ^[7]	T R-50 型橄 榄振 动采 收机		配套拖拉机 动力：≥44.8 k W 采收树干/树枝直 径：≤480 mm 伸缩臂最大伸展 5 000 mm 外形尺寸：3625 mm×4 500 mm× 1 648 mm	橄榄 为主
牵引式	临沂 沂瓦 力机 械设 备有 限公 司 ^[8]	4 ZG-25 型果 树振 动采 收机		配套拖拉机 动力：≥51.5 k W 采收果树直 径：<250mm 外形尺寸： 2800×1750×2200 mm 振动频率： 10-12 hz	对采 摘的质量 要求不 高、果品 较为坚 硬的且 不怕损 伤的干 果类、 坚果 类和部 分新鲜 水果

					果、如红枣、沙枣、椰枣、核桃、巴旦木、银杏、开心果等
自走型	临沂瓦力机械设备有限公司 ^[9]	4 YGZ-21 型果树振动采收机		配套动力： GB40B 发动机 (三菱 13 马力) 采收果树直径： $<210\text{mm}$ 外形尺寸： $2345 \times 1000 \times 2100\text{ mm}$ 振动频率： $8-12\text{ Hz}$	主要面向各类坚果
自走型	邢台安特斯机械制造有限公司 ^[10]	4 YG-28 摇果机		配套动力： $\geq 36.8\text{KW}$ 采收果树直径： $<280\text{mm}$ 外形尺寸： $5400 \times 1500 \times 2200\text{ mm}$ 振动频率： $10-12\text{ HZ}$	碧根果、核桃、椰枣、橄榄果等

该类产品目前也正往智能化、机电一体化等方向发展，因其具有较广的使用场景，越来越多的企业和研究所正不断投入研究之中。

2 核桃振动采收影响因素

2.1 振动参数

在对核桃进行振动采收时，振动的时间、频率和振幅均能对采收结果产生影响。采用优化设计的方法，通过多次实验寻找最佳的组合参数。

王长勤等^[11]通过对新疆阿克苏地区核桃树进行振动采收，并结合落果相关情况进行分析，利用响应面法总结振动频率与核桃落果之间的一般规律，并寻找最佳的采收频率。经过计算发现，当振动采收装置激振频率在 20Hz 时，树体的采净率和振幅均达到最大值，最大振幅为 8.83mm ，此时能达到的最大采净率为 92.6% 。刘浩等^[12]通过对核桃树体进行仿真发现，当振幅达到 10mm 时，核桃树体的采净率达到最大 $90\% \sim 95\%$ 。

2.2 树体本身形状与状态

以南疆大核桃树为例，王世江等^[13]对核桃树进行了有限元分析，并辅以田间实验，通过实验发现不同树体主枝共振频率不同，而对于同一棵核桃树来说，其各个主枝的共振频率也各不相同，主枝上侧枝的数量与共振频率成反比。DE LANGRE E^[14]通过对核桃树进行实验发现，核桃树枝本身的柔性程度会对树体共振频率产生影响，从而使得树体在低频范围内存在多个共振峰。

2.3 核桃成熟度

在对核桃进行振动采收时，核桃本身成熟度也会产生影响^[15,16]。核桃成熟度越高，其果柄结合力越小，也更容易脱落，仅需较小的振动频率和振幅即可实现采收。乔园园^[17]等依据核桃开口的大小，对不同成熟度的核桃进行分类实验，发现核桃果实的外壳硬度与果柄结合力成正相关，且果实越成熟，果实的分离力越小，果实成熟度的分类如下图所示。

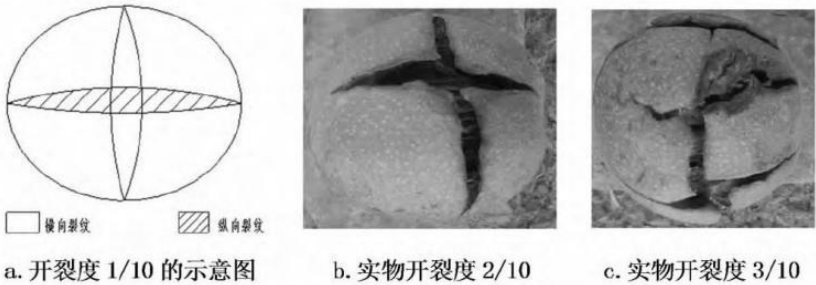


图 4 核桃成熟度分类

郭关柱等^[18]对核桃进行分类，核桃刚刚形成时，其成熟度定义为 0，核桃皮呈现局部黄色且细端无开裂，成熟度定义为 80%，对核桃皮表面泛黄且出现 1 到 2 个裂口，定义其成熟度为 90%，对核桃皮普遍变黄且全开裂定义成熟度为 100%。对以上不同成熟度的核桃进行分离力测试，发现随着成熟度的不断提高，果柄分离力逐渐减小。

3 林果振动采收机械研究方向

目前，我国核桃采收以振动采收为主，当对树干施加外激励时，振动会沿着树体传递到树枝，在树枝末端的果实也会随之产生受迫振动，并由此产生加速运动。果实由于加速运动产生的惯性力大于果实与果柄之间的结合力时，核桃果实就会挣断果柄产生脱落。接下来本文将从振动采收机理、建立动力学模型和基于高速摄像仪的果实运动实验这三方面进行分析。

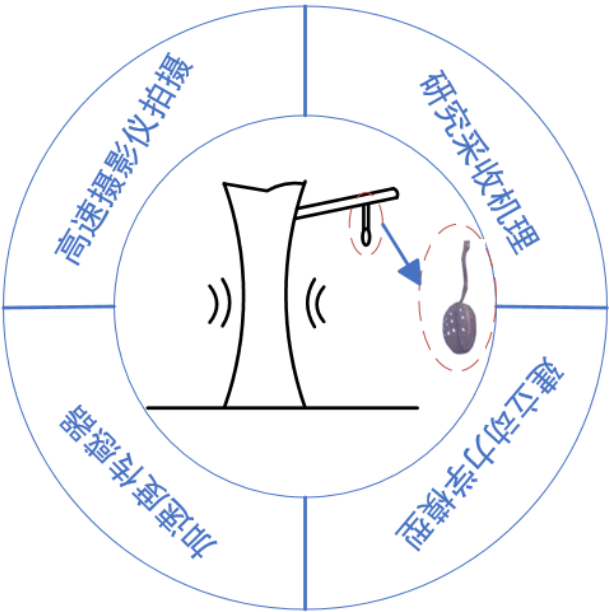


图 5 振动采收研究方式

3.1 振动采收机理研究

国外林果产业较为发达，对于振动采收方向的研究也开始的比较早，目前学者们主要把关注点放在果树本身的固有频率和采收时最佳的激振参数上。Adrian 和 Fridle^[19]最先提出了振动采收的相关基础理论，

并认为可以把激振点放在树干处达到提高激振效率的目的。。Blanco-Roldán^[20]等进行了油橄榄采收试验，并在实验中使用了连续式振动收获机。试验结果表明：在收获季的初期和中期，以（10+10）秒的振动持续时间效果更佳，比起连续振动 20 秒的方式，在收获季开始时，当平均振动持续时间为 13.3 秒时，果实采收率可达 90%。Castro-García^[21]等查了成熟果实和未成熟果实的频率响应，以确定高效和选择性收获的最佳频率范围。对 14 个枝条进行了实验室振动传递测试，这些枝条结出了 76 个成熟果实和 151 个未成熟的“瓦伦西亚”果实。果实和树枝对强迫振动的响应由几组五个三轴加速度计和动态信号分析仪测量。对于低于 10Hz 的机械收割，确定了三个具有最高振动传输值的频率范围。第一个频率范围（1.5-2.5Hz）与最有效的振动传输最吻合，涉及 90% 以上的水果。第二个频率范围（4.5-5Hz）成功地区分了成熟果实和未成熟果实。在此频率范围内，53.4% 的成熟果实将加速度放大了 2.2 倍，而只有 7.3% 的未成熟果实将加速度放大了 4.4 倍。第三个频率范围（7-8Hz）的振动传输值最低。



图 6 瓦伦西亚橙振动试验

同时，他们通过施加强制振动并用三轴加速度计测量树枝的响应^[22]，测试了“瓦伦西亚”甜橙树的 2 个次生树枝。分三个阶段对树枝进行测试：有果有叶枝条、有果无叶枝条和无果无叶枝条，如图 7 所示。在分支中确定了三个固有频率值，分别为 2、7 和 11Hz，随着振动频率的增加，沿分支的加速度传输率降低。第一个固有频率的加速度传输值最高，在出果枝中高达 1.3 倍，在出叶枝中高达 4.6 倍。果实在树枝上的存在并没有改变树枝的固有频率值，但会略微降低加速度传播率的值。与此同时，树枝上叶子的存在具有双重效果，降低了第一固有频率并大大抑制了加速度的传播性。



图 7 有果有叶、有果无叶和无果无叶枝条

国内对此类研究开始的比较晚。安徽农业大学孙兴东等^[23]通过动态试验和模拟研究了苹果树枝的振动机理和分离变形规律。通过实验发现，当振动频率为 3Hz，振动幅度为 20mm 时，苹果所承受的最大分离力为 18.71N，大于茎与枝之间的结合力，可实现落果。西安大学科技学院魏娟等^[24]通过分析了开心果采摘过程中的力，发现影响果实振动脱落的主要因素是激励力-频率、振幅和夹紧高度。通过模态分析得到振动频率的有效范围。振动装置与树的刚柔耦合模型揭示了果实组合点的响应特性。最佳振动参数为力幅度 3 000N、振动频率 18Hz 和夹紧高度 700mm。优化后，果树采收率达到 90% 以上，增长 1.46 倍。

综上所述,从振动采收机理来说,目前国内外研究更多的把目光聚焦在采收时最佳的激振参数上,并对激振在其树体内的传递状态进行了研究,但很少有针对性对树枝和果实局部动态进行细致研究,如果实具体的运动轨迹和树枝的振形等。对于核桃振动采收研究而言,可以从此方向入手,对振动时核桃果实和树枝的运动轨迹进行探究。

3.2 建立动力学模型

国外很早就开始了对树体进行动力学建模的研究。Parchomchuk 和 Cooke^[25]在对苹果进行振动采收时,利用双摆模型重新定义了果柄之间的运动关系,代入相关实验数据后发现在果实摆动时,其产生纵向运动的振动频率,是其固有频率的两倍。Tsatsarelis^[26]将果实与果柄看作同一系统,并将整个系统设置为二自由度,同时从其线性粘性和非线性粘性进行对比研究,并加入阻尼。Villibor^[27]对咖啡果梗系统进行动力学建模研究,将果梗视作可以扭曲变形的柔性梁,利用仿真对其进行研究,发现果实与其果柄之间的果柄结合力和扭矩会随着振动频率的变化而变化,在高频时其结合力和扭矩都会变得更小。Diener^[28]也是对振动采收时苹果的运动轨迹进行研究,并将苹果在振动时的运动形态分为平移、摆动和旋转三种形式,这与 Rumsey^[29]对橘子和葡萄进行振动时,所发现的运动形态一致。Ciro V^[30]对咖啡豆进行研究,并将其果实与果柄视为一个整体,作为一个单自由度的系统,结果发现不同成熟度的咖啡豆固有频率不一样,未成熟的咖啡豆其固有频率更高。

国内对此类研究开始的比较晚,但开展了较多的相关研究。北京林业大学刘昌邑等^[31]通过振动采收实验,建立了一种新的核桃振动收获过程中的动力学理论模型,分析了振动响应,包括运动形态(运动轨迹和下降位置)和分离力。然后进行现场测试以验证理论模型。理论和实验结果表明,核桃在振动收获过程中的运动轨迹类似于椭圆,下降位置位于轨迹的两个端点之一。理论上,分离力与振动幅度和振动频率的平方成正比。北京林业大学曹佳乐等^[32]通过建立局部振动模型,分析了不同振动模式下的茎-枝和茎-果实动力学模型。搭建了一个“枝-果子系统”平台,分别对不同模式的静态分离力进行测试。将各振动参数与局部果秆-枝条振动模型相结合,分析了振动响应的惯性力和静态分离力,推导了不同振动参数下的分离比。在频率为 10Hz、振幅为 80mm 的振动响应中,枝与茎、茎与尾果、茎与副果连接点惯性张力的最大分离比分别为 0、25.5%和 26.3%;惯性弯矩的最大分离率分别为 86.4%、96%和 83%;产生惯性弯矩的运动模式的分离难度系数远低于产生惯性张力的模式。

综上所述,从建立动力学模型研究的角度来说,国内外研究更多的是将模型局限于二维运动中,果实振动过程种在三维空间内的运动形态并没有进行全面的探究,且在研究过程种很少有把果柄视为柔性体构建模型。且在对果实的运动姿态进行具体分析时,往往将其分为平移、摆动和旋转三种简单的类型,并由这三种类型进行简单复合,这种复合运动无法准确描述果实在空间内的真实运动形态。对于核桃这种无柄果实而言,在振动过程中其运动状态更为复杂,需要对其进行更深入的探究。

3.3 基于高速摄像仪的运动研究

高速摄影仪是近年来用于研究果实运动的主要方式,其通过非接触式的方式采集数据,能够在避免传感器负载对果实运动产生影响的同时,通过图像的方式更好的表现果实各种姿态。Torregrosa^[33]通过高速摄影拍摄柑橘在振动下的运动轨迹(图 8),通过采集到的图像数据分析柑橘位移和加速度等相关运动参数相应情况,结果显示柑橘在运动时其水平方向所受到的力大于所产生的切向力。Castro-García^[34]等利用高速摄影仪拍摄橄榄在振动采收时的运动状态,并成功分析出在采收过程中果实受伤的主要原因。Zhou^[35-37]等通过高速摄影仪对樱桃的运动姿态进行拍摄,通过图像处理发现在振动过程中樱桃大约有 70%的运动形态是跳跃和摆动的,而在此类运动状态下对果实的损伤最小。通过对不同频率下的碰撞次数进行对比发现,18Hz 的碰撞次数要比低频率的要少,但果实的损伤率要给不少。



图8 柑橘运动图像采集系统

国内目前通过高速摄影仪采集果实运动状态的实验较多。蔡菲^[38]等利用高速摄影仪拍摄杏子的运动状态,对果实脱落时果柄结合力进行研究,发现在脱落时果实能够达到的最大相对速度为 1.72m/s ,在脱落瞬间加速度能达到的 427m/s^2 ,此时能够达到的最大脱落力为 5.12N 。何苗^[39]利用高速摄影仪拍摄枸杞在振动时枝条的相应状态,并以此为基础对枝果进行了振动落果实验,通过分析图像数据可以知道,当采收装置激振频率为 18.22Hz 且振幅达到 7.87mm 时,枝条末端的行进速度可以达到 20.93mm/s ,此时能够顺利落果。彭俊^[40]等通过分析冬枣在不同激振频率下的运动形态,发现冬枣在脱落时产生的惯性力要小于在静态下所测得的果柄结合力,且果实在脱落时其运动状态为旋转。

韩元顺等^[41, 42]通过高速摄影仪进行拍摄在板栗果实振动时运动轨迹,并对其脱落状态进行分析,结果表面板栗在激振作用下随着频率的变化轨迹也会发生改变。

综上所述,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。对于核桃果实而言,在采收过程中也会产生多种运动姿态,对不同运动姿态进行研究分析可以为振动采收机构改进提供强有力的支撑。

3.4 基于加速度传感器的研究

加速度传感器是研究振动采收时树体运动状态的主要手段之一,如下图9所示是加速度传感器的使用方式,通过这种方法可以较为准确的探究激振在树干与树枝之间的传递情况。

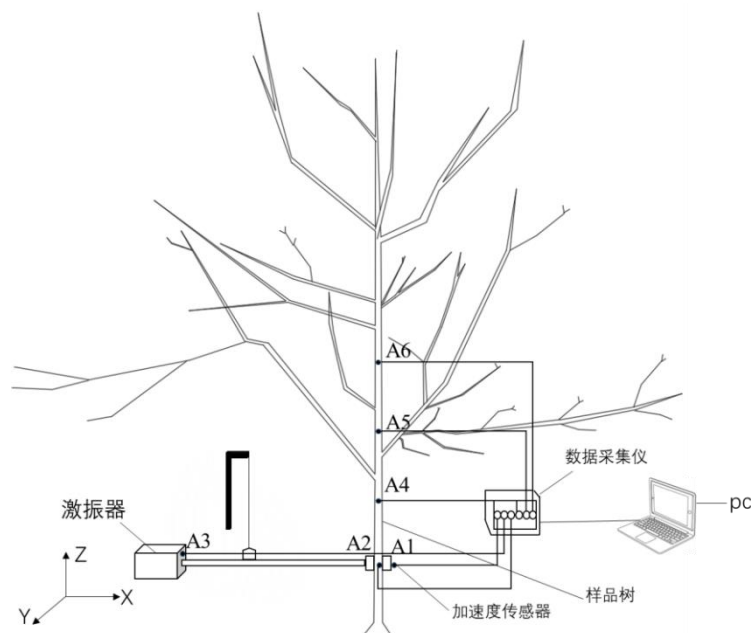


图9 加速度传感器使用方式

国外对此进行了大量研究, Schindler 等^[43]在树体不同位置处安装了3个加速度传感器以研究在风作

用下树干的运动状态;Leone 等^[44]在橄榄树干及夹持装置上分别布置了多个加速度传感器研究振动装置工作时振动的传递情况;Du 等^[45-46]在樱桃树主干上放置力传感器,在树体的主干和分支上分别布置加速度传感器,用激振装置对树主干施加正弦激励从而获得各个测点所搜集到的振动相应信号。

国内也有不少学者对加速度传感器进行了实验。散鋈龙等^[47-48]和杨会民等^[49]在实验用小型杏树树枝上分别布置 3 个加速度传感器,并通过激振装置对树干主体的不同位置施加激振,从而得到激振影响与加持位置之间的关系;陈志健等^[50]在油茶果树的两个分支上分别布置了两加速度传感器,通过力锤锤击树体直径在 60mm 左右果树获得树的频谱特性;聂宏宇等^[51]在研究蓝莓植株时,在植株的分支上分别安装了 2 个三向加速度传感器,对植株主体进行锤击,从而获得蓝莓植株的相关频谱。

综上所述,国内外均通过加速度传感器对采收树体进行了研究,但研究方向更主要集中在探讨树体频谱特性,很少有对树干及各个分支在受到外激励时运动状态进行思考。在对核桃进行振动采收时,其树体对外激励的传递情况直接决定了振动采收的效率。通过加速度传感器对核桃振动采收时树体运动状态进行研究,能够为振动采收机构进一步优化提供理论支撑。

4. 林果振动采收研究现存问题

针对目前振动采收机械的相应研究主要集中在采收机理及建立果实动力学模型及通过高速摄影仪研究果实运动轨迹上,并已经做了大量的工作,但目前仍存在以下一些问题需要进一步探讨。

4.1 对果实运动轨迹的研究不全面

在对核桃树进行振动时,往往将目光集中在对树体整体振动的振形和振动的落果率上,对果实在振动过程中其自身的运动过程还不够了解,核桃在受迫振动下其具体运动姿态需要进一步探究。

4.2 对果柄受力情况的研究不全面

对果实具体的脱落机理缺乏相应研究,对于不同类型果柄的果实并没有很好的区分。核桃果实属于无柄果实,其运动轨迹与普通的有柄果实有所区别,需要进一步研究。

4.3 难以确定最佳采收参数

在采收过程中由于对树体的夹持和振动会对树体本身产生影响,需要找寻最佳的采收频率和振幅,尽可能缩短振动时间具有重要的意义。但在真正采收时,由于不同的树木果实数量、树冠大小、树高和树体形状等因素都不相同,果实的成熟度也都不一样,因此很难确定该树的最佳激振参数^[52]。

4.4 对果树的损伤大

在激振过程中,由于激振装置需夹紧树体,由此形成的夹持力以及持续性的大幅激振会对树体本身产生影响,造成其根部松动甚至折断树枝,严重时甚至会使果树第二年检测乃至死亡。王长勤等^[53]对核桃树树体进行振动试验时,分别采用 10、15、18 和 20Hz 四种不同频率进行实验,对树体影响如下图 10 所示,可以明显看出随着振动频率的增加,对树体的伤害也逐渐变大。

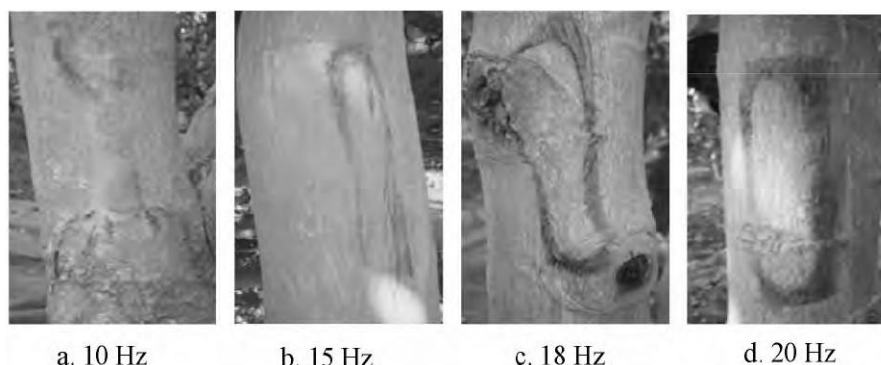


图 10 种不同频率下振动采收对树体的影响

因此在采收时,如果为了提高采净率而盲目追求较高采收频率,会对树体产生较大影响,为了保护树体本身的同时平衡采收率,可以从多个方面入手。在进行采收时,可以尽量选择长有较多成熟果实的果树,

以便在较低频率下即可实现落果。在对采收机构进行设计时,可以把气力式与振动式结合起来,或者采用拍打形的振动采收机,将激振点放在树枝上,减少对树体的影响。

4.5 机械结构复杂操作难

振动采收机械的作业场地一般位于田间,环境较为复杂且各种土石较多,对于使用振动采收的果农而言,机构需要做到尽可能的简单,易操作,通过少量的控制即可完成采收工作。过于复杂的机械会使得果农在使用过程中对果实机械设备造成损坏。

5 核桃振动采收机械发展趋势

5.1 新型采收设备的研发

由于我国存在多种不同地形,对核桃采收机械的研发构成挑战。在对振动采收类机械进行设计时,需要综合考虑机械的具体应用场景,根据需求开发新式的机器。在未来新研发的采收机械平台上,可以增加导航与自动识别功能,能够感知周围的环境情况,以实现采收装置智能化的发展。对于车轮地盘可以采用履带式或气动悬挂的布局,以提高车辆的通过性,适应复杂的山区环境。对于采收机构的机械臂,能综合开发多角度的振动头,在夹持住果核桃后能够从多个不同角度振动,能够适应树枝的不同生长方向,提高采收效率。

5.2 加强振动采收机理的研究

我国对核桃振动采收机械的理论性研究起步较晚,缺乏相应的积累,对核桃树树体的振型、动力学特性等方面的相关知识储备还有所欠缺,未能完全掌握树体自身动力学的相关性质对振动采收的影响,且对果实振动过程中所产生的多种运动姿态没有很好的了解。对此,可以对树体本身进行多动力学实验,利用高速摄影仪拍摄等方式,研究采收机械-树体、树枝-果实之间的振动关系,并对各个因素影响落果率的情况进行分析,为研发新式振动采收机械提供理论依据。目前对树体进行三维建模时往往只到树体的一级枝,对于现实中果树的二级乃至三级枝并没有详细分析,对果树模型进行有限元分析时以常常停留在前几阶振型,需要过更深入的研究各级枝之间的动力学关心。在对果实运动状态进行研究时,对柔性果柄对激振的影响研究不够透彻,需要更多给考虑不同果柄对果实运动姿态的影响。

5.3 推广果园化种植方式

我国目前仍有较大部分地区的林果以低矮密集型种植方式为主,果树与果树之间较为密集,大型振动采收机械无法进入作业,只能通过人力采收,费时费力。因此,针对林果种植环境等因素综合考虑,尽可能的进行规范化果园化的种植模式,在保证林果产量的同时给机械化操作预留空间。与此同时,开发更过适合单人背负式的振动采收装置,能够满足无法果园化种植的山区地区的需求。

随着我国人民生活水平的不断提高,对核桃的需求量也与日俱增,在此背景下核桃振动采收机械具有较大的发展空间。采收机械实现自动化、智能化、机电一体化等是目前研发的主流方向,充分利用机械方式采收能够节省大量人力物力的同时提高采收效率,具有较大的经济效益。核桃采收机械也是促进林果产业发展的重要一环,在我国起步较为晚的前提下,应该充分吸收国外发展经验,从理论基础入手,生产出更多更符合我国国情的本土化振动采收机械。

参 考 文 献

- [1]中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2023[J]. 北京: 中国统计出版社, 2023
- [2]吴泊辉. 新疆林果业生产机械化现状及对策分析[J]. 农机市场, 2022(10):57-59.
- [3]闫锋欣, 李许杰, 杨永霞, 等. 手持冲击梳刷式油茶果采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023: 1-12.
- [4]王长勤, 许林云, 周宏平, 崔业民, 崔华. 偏心式林果振动采收机的研制与试验. 农业工程学报. 2012,28(16):10-16.
- [5]吴永金,王涛,刘帆等.手持背负式水果采摘机的设计[J].科技资讯,2019,17(22):61-63.
- [6]许林云,刘冠华,周杰,等.一种小型振动采收装置[P].江苏省: CN202010542462.1,2021-08-24.
- [7]SICMAS.P.A[EB/OL].[2023-03-01].<https://www.sicma.it/eng/>.
- [8]临沂瓦力机械设备有限公司[EB/OL].[2024-05-01].<http://www.walijixie.cn/>.
- [9]临沂瓦力机械设备有限公司[EB/OL].[2024-05-01].<http://www.walijixi.cn/>.
- [10]邢台安特斯机械制造有限公司[EB/OL].[2024-05-01].<http://www.antesijixie.cn/>.
- [11]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.
- [12]刘浩,戴宁.基于树干振动原理的核桃采收机设计[J].机械制造与自动化,2023,52(01):226-229.
- [13]王世江,许燕,周建平,等.大型核桃树振动响应特性与落果试验研究[J].农机化研究,2024,46(10):180-186.
- [14]DE LANGRE E. Plant vibrations at all scales a review[J]. Journal of experimental botany, 2019,703521-353
- [15]薄颖生,翟梅枝,彭少兵,等.3个核桃品种果实生长对其生理落果的影响[J].林业科技通讯,2018,(05):88-90.
- [16]薄颖生,翟梅枝,毛富春,等.两个品种核桃果实生长模型及生理落果规律研究[J].北方园艺,2013,(02):33-35.
- [17]乔园园,牛长河,刘向东,等.核桃果柄分离力与其影响因素的相关系数研究[J].新疆农业科学,2014,51(03):524-531.
- [18]郭关柱,杨李洋,罗亚南,等.基于无人机平台的气振式核桃采收机设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(01):55-64.
- [19]Adrian P A, Fridley R B. Dynamics and design criteria of inertia type tree shakers[J]. Transactions of the ASAE, 1965, 8(1) : 12-14.
- [20]Castro-García S, Blanco-Roldán 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.
- [21]Castro-Garcia, Blanco-Roldán, Ferguson, et al. Frequency response of late-season 'Valencia' orange to selective harvesting by vibration for juice industrys[J]. biosystems engineering, 2016, 155, 77-83.
- [22]Castro-Garcia, Aragon-Rodriguez, Fernando, Arias-Calderon, Rocio, et al. The contribution of fruit and leaves to the dynamic response of secondary branches of orange trees[J]. biosystems engineering, 2020, 193, 149-156.
- [23]Sun Xingdong, Wu Wandí, Cao, Chengmao, et al. Research on vibration response characteristics and separation deformation law of fruit-branch system[J]. aip advances, 2023, 13, 6
- [24]Wei Juan, Yang Guang-Yuan, Yan Hao, et al. Rigid-flexible coupling simulation and experimental vibration analysis of pistachio tree for optimal mechanized harvesting efficiency[J]. mechanics of advanced materials and structures[J]. 2021, 28(22), 2360-2369
- [25]Crooke J R, Rand R H. Vibratory fruit harvesting: A linear theory of fruit-stem dynamics[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1970,14(3): 195-209.
- [26]Tsatsarelis C A . Vibratory olive harvesting: The response of the fruit-stem system to fruit removing actions[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1987, 38(2): 77-90.
- [27]Villibor G P, Santos F L, Queiroz D, et al. Dynamic behavior of coffee fruit-stem system using modeling of flexible bodies[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166(1): 9-22.
- [28]Diener, R. G. Mohsenin, N N. Jenks B L. Vibration characteristics of trellis-trained apple trees with reference to fruit detachment[J]. Transactions of the ASAE, 1965, 8(1): 20-24.
- [29]Rumsey J, Barnes, K K. Detachment characteristics of desert-grown oranges and grapefruit[J]. Transactions of the ASAE, 1970, 13: 528-530.
- [30]Ciro V H J. Coffee harvesting I: Determination of the natural frequencies of the fruit stem system in coffee trees[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2001, 17(4): 475-479.
- [31]Liu Changyi, Xu Daochun, Cao Jiale. Vibration Response of Walnuts under Vibration Harvesting[J]. agronomy-basel, 2023, 13, 2.

- [32] Cao Jiale, Bai Xiaopeng, Xu Daochun, et al. Experiment and analysis on walnut (*Juglans regia* L.) shedding force based on low-frequency vibration response[J]. industrial crops and products, 2023, 204, partA.
- [33] 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.
- [34] Castro-Garcia S, Rosa U A, Gliever C J, et al. Video evaluation of table olive damage during harvest with a canopy shaker[J]. HortTechnology, 2009,19(2): 260-266.
- [35] Zhou J, He L, Karkee M, et al. Analysis of shaking-induced cherry fruit motion and damage[J]. Biosystems Engineering, 2016, 144: 105-114.
- [36] Zhou J, He L, Zhang Q, et al. The effect of shaking frequency on fruit motion patterns and damage rate during cherry detaching process[J]. 2013 ASABE annual International meeting, 2013.
- [37] Zhou J, He L, Zhang Q, Du X, Chen D, Karkee M. Evaluation of the influence of shaking frequency and duration in mechanical harvest of sweet cherry[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2013,29(5): 607-612.
- [38] 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(04): 208-212.
- [39] 何苗, 坎杂, 李成松,等. 枸杞振动采收机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 47-53.
- [40] 彭俊. 冬枣振动收获机理研究[D].西北农林科技大学, 2017.
- [41] 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(03):133-141.DOI:10.13360/j.issn.2096-1359.202008026.
- [42] 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(03):599-613.
- [43] SCHINDLE R D, VOGT R, FUGMANN H, et al. Vibration behavior of plantation-grown Scots pine trees in response to wind excitation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(7/8): 984—993.
- [44] LEONE A, ROMANIELLO, TAMBORINO A, et al. Identification of vibration frequency, acceleration, and duration for efficient olive harvesting using a trunk shaker[J]. Transactions of the ASABE, 2015, 58: 19—26.
- [45] DU X Q, CHEN D, ZHANG Q, et al. Dynamic response of sweet cherry tree to oscillating excitations for mechanical harvest[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(26): 83—88.
- [46] DU X Q, CHEN D, ZHANG Q, et al. Dynamic responses of sweet cherry trees under vibratory excitations[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(3): 305—314.
- [47] 散望龙, 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.
- [48] 散望龙, 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.
- [49] 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.
- [50] 陈志健. 面向机械振动采收的油茶树冠层识别与分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021.
- [51] 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.
- [52] 许林云,刘冠华,周杰,等.用于振动采收的有果有叶果树振动模型构建[J]. 农业工程学报,2020,36(11):1-12.
- [53] 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.