

基于电子果实技术的核桃多点同步振动参数监测与脱落条件研究

贾娜 薄嘉成 张航宇 刘九庆

(东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 设计了一款面向核桃的电子果实系统,该系统整合了多点振动参数采集及模拟脱落功能,用于研究采摘过程中的动力学行为及脱落条件。通过建立核桃与树体的动力学模型并确定核桃脱落判定条件,研制了设备及其配套的室内实验平台。通过室内实验验证了电子果实系统的功能可靠性。在户外实地采摘实验中,通过电子果实系统多点同步采集果实振动数据并分析,结果表明,核桃在振动采摘过程中主要做法向振动,核桃所受法向力是导致其脱落的主要因素。整合了多点同步测量及模拟脱落功能的电子果实系统可为研究核桃的脱落条件提供有效的数据支撑。

关键词: 电子果实系统; 核桃采摘; 脱落力; 多点同步分析

中图分类号: S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)10-0215-08

OSID:



Monitoring of Multi-point Synchronous Vibration Parameters and Dropping Conditions of Walnuts Based on Electronic Fruit Technology

JIA Na BO Jiacheng ZHANG Hangyu LIU Jiuqing

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: An electronic fruit system specifically designed for walnuts, integrating multi-point vibration parameter collection with simulated fruit abscission functions was developed to investigate the conditions under which walnuts detached from the tree. The development process involved creating a dynamic model that described the interaction between walnuts and the tree, establishing criteria for walnut abscission, and designing a device along with an indoor experimental platform to test the system's capabilities. The reliability and functionality of the system were confirmed through indoor experiments, which demonstrated its effectiveness in accurately collecting and analyzing vibration data from walnuts. Subsequent outdoor field tests were conducted to evaluate the system's performance in a real-world setting. During these tests, the electronic fruit system collected synchronized multi-point vibration data, providing insights into the dynamics of walnut detachment. The data analysis revealed that during vibration-assisted harvesting, walnuts predominantly experienced normal vibrations, with the normal force exerted on the walnuts being the primary factor leading to their detachment from the tree. The system's integration of multi-point synchronous measurement and simulated abscission functionality offered significant advantages for studying walnut drop conditions. Moreover, this technology showed promise for application in automated harvesting of other crops, potentially revolutionizing agricultural practices by enhancing efficiency and effectiveness in crop management. By providing detailed and actionable data, the electronic fruit system not only advanced understanding of walnut abscission but also contributed to the broader goal of improving harvesting techniques and practices across various agricultural sectors, making it a valuable tool with extensive future applications in the industry.

Key words: electronic fruit system; walnut harvesting; detachment force; multi-point synchronous analysis

收稿日期: 2024-05-10 修回日期: 2024-07-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2202105-1)

作者简介: 贾娜(1975—),女,副教授,博士,主要从事林业智能采摘装备研究,E-mail: jiana@nefu.edu.cn

通信作者: 刘九庆(1971—),男,教授,博士,主要从事林业智能采摘装备研究,E-mail: nefujdljq@163.com

0 引言

核桃作为全球农业经济中极具价值的林果作物,在食品、医药及化妆品等众多领域拥有庞大的消费市场^[1-4]。2021年,我国核桃产量达到 $5.4035 \times 10^6 \text{ t}$ ^[5],随着产量的稳步增长,如何充分挖掘其经济潜力并促进核桃种植业发展,成为了一个重要议题。在现代农业中,机械化采摘技术的发展对提高作物产量和收获效率具有重要影响。对于核桃等坚果作物,采用振动采摘技术已成为提高收获效率和减少劳动力的关键手段^[6]。振动采摘设备通过向树干或枝条施加特定频率和幅度振动,促使果实脱落,从而实现机械化采收^[7-9]。这种方法不仅可以显著加快采摘过程,还有助于减少果实在采摘过程中的损伤,保证果实品质。

然而,现有振动采摘技术面临诸多挑战,特别是在振动参数精确控制和实时监测方面^[10]。目前,苹果和砂糖橘采摘中已尝试使用封装传感器的模拟果实,即所谓的“电子果实”,以监测振动对果实的影响^[11-14]。这些电子果实能够模拟真实果实的物理特性,并在采摘过程中实时传送数据,用于优化振动参数,但目前该技术尚不能进行多果同步测量,也无法模拟果实的自然脱落过程,限制了其在大规模商业采摘中的应用。

鉴于此,本文开发一种新型的适用于核桃的电子果实系统。通过该系统更深入地研究振动采摘过程中果实的运动特性,进一步优化采摘设备设计,提高采摘效率,减少果实损伤,从而提升整体作业质量和经济效益,为核桃及其他类似林果的机械化采摘技术研究提供新的发展方向。

1 电子果实系统设计依据

为深入研究树体二级分枝上不同位置的振动响应及脱落机制,需建立树枝-果实系统动力学模型。基于该模型,分析核桃受迫振动过程的受载形式,确定需要监测的物理量及其阈值,明确判定核桃脱落条件。这些阈值和物理量构成电子果实系统的设计指标。

1.1 核桃果实-树枝动力学模型

在动力学分析中,考虑到核桃果实果梗较短,其影响通常被忽略,因此常将果实视为无柄果实进行模型化^[15]。如图1所示,以果实与树枝的连接点 O 为原点建立坐标系。当树枝受振时,原点 O 移动到新位置 O_1 。此时,定义果实半径 R 为从点 O 到果实质心 A 的距离。果实质心 A 与点 O 连线与竖直方向夹角为 θ 。同时,定义 y_1 为果实在 Y 方向位移, z_1

为果实在 Z 方向位移。

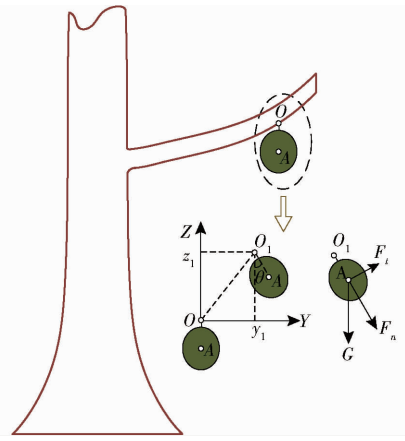


图1 系统动力学模型

Fig.1 Dynamic model of system

无柄果实所受惯性力是造成其脱落的主要受载形式^[16-17]。惯性力可分解为切向力 F_t 和法向力 F_n ,分别为

$$F_t = mR \ddot{\theta} \quad (1)$$

$$F_n = mR \dot{\theta}^2 \quad (2)$$

式中 m ——果实质量,kg

$\ddot{\theta}$ ——果实绕点 O 转动角加速度, rad/s^2

$\dot{\theta}$ ——果实绕点 O 转动角速度, rad/s

现有研究认为果实所受法向力是导致果实脱落的主要原因^[18-20]。式(1)和式(2)中涉及的物理量均需通过电子果实检测。

1.2 核桃脱落条件分析

核桃果实脱落通常发生在其所受惯性力 F_A 超过分离力 F_0 的情况下。分离力 F_0 是指将果实从树枝上分离所需的最小力,可以在特定角度下使用拉力计进行测量。该分离条件被广泛应用于林果采摘设备设计与标准制定过程中^[16-17,21]。

然而,果实脱落是一个涉及多种运动形式的复合过程,不仅是某一特定角度下的单向拉伸。实际上,果实脱落是生物力学与物理力学共同作用的结果。随着果实的成熟,果梗与树枝之间的生物结构发生变化,从而促进果实脱落。而采摘期间的化学药物喷洒也是常见的外界干预方式^[22-24]。

在林果采摘设备设计中,合理设置脱落地至关重要。虽然提高脱落地设计值可以确保高落果率,但也可能导致树体破坏并降低林果品质。因此,确定合理的脱落条件,平衡采摘效率与树体损伤,是优化设备设计的关键^[25]。

惯性力计算通常可以通过合成各分力后求和,或是基于牛顿第二定律进行。由于合成各分力涉及繁杂的矢量运算,导致计算量大,不利于系统的实时

响应与高频通信。本研究采用电子果实内置的九轴加速度计来直接测量果实的绝对加速度,再通过牛顿第二定律计算出果实所受惯性力。该方法避免了繁杂的矢量运算,能够即时提供准确的动态数据,从而更适合实时监测和数据分析应用。因此,本研究选择使用绝对加速度作为评估果实脱落条件的判断标准。

2 系统设计与实验

2.1 电子果实系统功能设计

针对核桃多点同步振动参数检测与模拟脱落功能,设计了一套基于电子果实技术的测量系统。该系统由多个电子果实和上位机组成。其中,针对系统开发的电子果实搭载了惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU),可通过数据融合算法提供种类丰富的振动参数,并可通过控制电磁铁通断模拟果实脱落,还可通过蓝牙技术实现与上位机无线传输数据,保证数据实时性和准确性。使用上位机识别多个电子果实的介质访问控制(Media access control, MAC)地址,并分别记录数据,进而实现多果实同步数据采集。其工作原理见图 2。

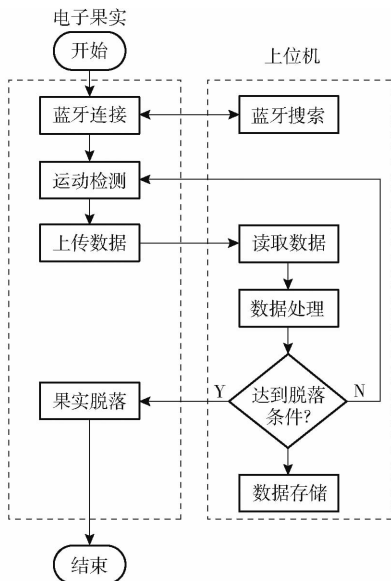


图 2 电子果实系统工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of electronic fruit system

2.2 电子果实系统设计与制作

电子果实主要由 IM948 惯性测量模块、锂电池与充放电模块、场效应管及 ELE-P25/11 型电磁铁等部件组成。

电子果实搭载的 IM948 惯性测量模块是由黄山辰翼电子科技有限公司研发的小尺寸九轴姿态传感器模块,支持蓝牙和串口通信功能,如图 3a 所示。该模块集成了 32 位 DSP 处理器、蓝牙 5.0 技术、九轴加速计、陀螺仪及磁力计,并具备内置充电管理和

超低功耗技术。其加速度量程为 $\pm 16 g$,能以最高频率 250 Hz 主动上报数据。模块预留了一个通用输入输出端口(General-purpose input/output ports, GPIO),该端口能输出 3 V 控制信号,与场效应管组成电子开关,用于控制电磁铁的通断,从而实现精确的脱落模拟与控制。



图 3 电子果实及主要模块

Fig. 3 Electronic fruit and main modules

为实现多点同步振动参数检测功能,开发了一个基于 Python 的多进程控制程序。该程序同时进行接收新数据、数据解析和文件写入的任务,在实现多点同步测量和模拟脱落功能的基础上提高了数据记录工作效率。

为实现模拟脱落动作,选用 ELE-P25/11 型电磁铁作为执行器,IM948 模块通用输入输出端口作为控制信号发出端,场效应管作为开关。其中,ELE-P25/11 型电磁铁最大吸力为 50 N,大于核桃果实分离力,可以保证电子果实在未收到指令时不会脱落。

使用三维建模软件按照“维纳”品种核桃的实际外形构建电子果实基体,如图 3b 所示。再根据电子元件尺寸设计基体内部空腔,最后在装配体中进行质量配平,保证其质心与真实核桃保持一致,电子果实内部结构如图 3c 所示。电子果实基体使用拓竹切片软件对模型编辑制作工艺,使用拓竹 A1 mini 打印机制作。

2.3 实验平台

实验平台主要由核桃振动采摘机、树枝、电子果实系统及机架组成,如图 4 所示。其中核桃振动采摘机由箱体、传动系统、偏心块激振系统、夹持系统组成,如图 5 所示。通过调整偏心块转向和转速,该设备能够实现多种激振模式。现有研究表明,夹持装置运动轨迹呈二维形式能提供最大激振力^[26-28]。因此,采用水平布置的 2 组偏心块,使其同向转动,提供有效的二维激振。

采摘机通过夹持系统与树枝固连,使树枝在二维平面内受迫运动,产生惯性力。在实验中,为避免采摘机损伤树体,设定采摘机振动频率为 25 Hz,电机转速均为 1 500 r/min。

2.4 系统功能验证实验

系统功能验证实验旨在验证电子果实系统在多



图4 实验平台

Fig. 4 Experimental platform

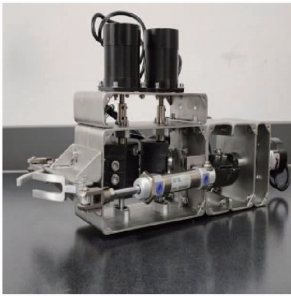


图5 振动采摘机

Fig. 5 Vibration harvesting machine

点同步数据采集及模拟脱落等功能的可靠性。

实验开始前,首先对电子果实进行标定,确保其在静置状态与运动状态下采集的数据均可靠,在此基础上进行模拟采摘实验。

从核桃树体上截取健康的一级分枝,记录其自然生长状态下的水平倾角,截取的树枝水平倾角约 16° 。利用夹具将其固定在实验台上,并调整树枝水平倾角与自然状态一致。选取其中一个二级分枝,测量其全长。以分枝根部为起点,末端为终点,标记树枝长度30%、60%、90%处作为测量点,并悬挂电子果实,如图6a所示。按果实对应的测量点,由分枝根部到末端,分别命名为果实A、B、C。



图6 电子果实系统功能验证实验

Fig. 6 Functional verification experiment of electronic fruit system

为模拟真实的树枝-果梗连接,选用柔性的TPU材料制作电子果实果梗,并在其末端设计适合与树枝接口的连接部分,如图6b所示。

果实脱落实验分为两部分:脱落条件测定与脱

落模块功能验证。先进行脱落条件测定,未预设任何脱落条件下,通过使用振动采摘机激振树枝,模拟采摘操作。在此阶段,记录并分析各电子果实在激振过程中的振动响应,特别是最大加速度,以此确定脱落条件。为减小实验误差,进行3次重复实验。

确定脱落条件后,进行脱落模块功能验证实验。在此阶段,设定一个明确的脱落阈值,并重新启动振动采摘机模拟采摘操作,观察并记录各电子果实在设定脱落阈值触发下是否能成功模拟脱落。同时,对于触发脱落的果实,检验其在脱落瞬间的绝对加速度是否达到先前测定的脱落条件。

2.5 果实端振动响应实验

为进一步验证电子果实系统在实际采摘环境中的可靠性及其对果实振动响应规律的检测能力,在户外选择树体进行实地采摘实验,使用上位机同时控制激振采摘机和电子果实系统。

挑选出与室内实验所用树枝长度和生长条件相似的树枝,选择的户外实验用树枝的水平倾角约 16° ,与室内实验所截树枝一致。在其二级分枝上,以分枝根部为起点,末端为终点,确立3个测量点,分别位于树枝长度的30%、60%、90%处,对应上述位置悬挂电子果实,命名为果实A、B、C,挂果位置如图7所示。



图7 户外实验

Fig. 7 Outdoor experiment

采摘实验中,通过上位机控制振动采摘机,产生频率为25 Hz的激振,并通过夹持装置将激振传递到树体,通过电子果实采集实验数据。为保证果实末端出现最大振动响应,激振过程持续10 s,激振结束后实验完成。

实验过程中,各电子果实所记录的实验数据将实时记录到上位机中的对应txt格式文本,通过上位机统一记录各果实每次回传数据包的时间,保证各果实采集数据的同步性和一致性。数据采集完成后,使用统计软件对实验数据进行后处理分析,以评估振动响应特征和电子果实系统性能。为保证电子果实系统提供数据的完整有效,在树体同一位置重复3次采摘实验。

3 结果与分析

3.1 电子果实系统功能验证

通过脱落条件测定实验分析 3 个电子果实(A、B、C)加速度响应,见表 1。实验结果显示,3 个果实在加速度响应峰值上存在显著差异。这种差异是由多种因素共同作用的结果,包括果实位置、果梗物理属性以及采摘机频率等。由于当前尚缺乏一个理论模型来精确计算果实脱落阈值,因此本研究采用实验的方法来设定这些阈值。

表 1 果实加速度
Tab. 1 Fruit acceleration m/s^2

参数	果实 A	果实 B	果实 C
加速度峰值	54.968	105.367	135.614
	55.164	106.955	136.316
	55.227	109.714	138.860
平均值	55.120	106.346	137.330

假设果实在采摘过程中可能承受的最大惯性力将导致其脱落。果实所受惯性力可通过牛顿第二定律,用电子果实检测的加速度与果实质量乘积计算得出。因此,将每个果实在实验中达到的最大加速度设定为其脱落条件,当果实加速度大于设定值时,表明其所受的惯性力大于脱落条件对应的脱落力,从而导致果实脱落。根据实验结果,设定 3 个果实脱落加速度阈值分别为 55.120、106.346、137.330 m/s^2 。

当果实端响应理论模型成熟后,在后续研究中通过将理论模型计算结果作为脱落阈值来验证理论正确性。

脱落模块功能验证实验结果如图 8 所示。由图 8 可知各果实的响应加速度最大值,其中果实 A 为 55.008 m/s^2 ,果实 B 为 107.435 m/s^2 ,果实 C 为 138.387 m/s^2 。实验中,果实 B、C 加速度超过了设定的脱落阈值,发生脱落并与地面发生碰撞。果实 A 加速度未达到脱落条件,持续受到激振,直到

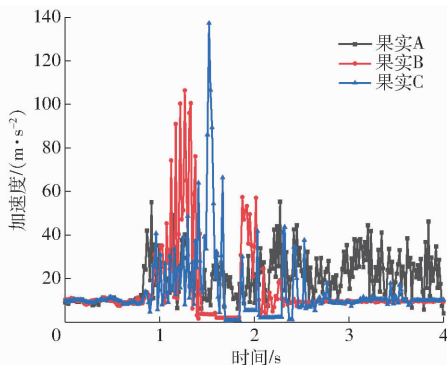


图 8 果实脱落实验加速度-时间曲线

Fig. 8 Acceleration-time curve of fruit shedding experiment

实验结束也未脱落。实验数据与脱落条件测定阶段的结果十分接近,证明了电子果实系统测量数据的可靠性。

由图 8 可知,尽管果实 A、B、C 受迫运动开始时间相同,它们达到加速度峰值的时间却不同。这表明,同一分枝上果实激振效果达到最佳时间不同,且距离树枝根部越远,达到加速度峰值需要时间越长,本实验中果实 A、C 达到加速度峰值时间相差约 0.5 s。

采摘过程中果实运动分为受迫振动阶段和下落阶段。受迫振动阶段,振动采摘机迫使树体振动,进而带动果实振动。果实 A 没有发生脱落,其持续受到激振,但是其振动响应并非周期性。这是因为采摘机激振频率与果实受迫振动频率不同导致的。这种频率偏差可能源于树体受迫振动与果实受迫振动的叠加效应。下落阶段,果实加速度响应稳定。直到与地面发生碰撞。果实 B、C 分别在 2、2.5 s 左右与地面发生了碰撞。然而碰撞产生的加速度较小,均不超过 60 m/s^2 ,远低于果实在受迫振动阶段所受的惯性加速度。

通过功能验证实验,不仅验证了电子果实系统采集数据的准确性和模拟脱落与多点测量功能的可靠性,还揭示了果实振动响应时序差异,即越靠近树枝根部的果实响应越迟。此外,监测到果实在采摘过程中的受迫振动与下落两个阶段的运动特性,发现下落阶段果实受冲击产生的加速度远小于受迫振动阶段果实所受惯性加速度。

3.2 果实端振动响应

在户外采摘实验中,振动采摘机以频率 25 Hz 进行二维激振采摘。电子果实系统记录实验数据。

图 9 为各果实的加速度-时间曲线。从图 9 可知,距树枝根部越远,果实加速度响应越大,与室内实验结果保持一致。各果实在激振过程中多次达到局部最大值,这些局部最大值出现时间呈现随机性。这可能是果实在采摘过程中受树体振动与自身运动复合的结果。根据牛顿第二定律,可计算各果实在激振过程中所受的惯性力最大值,如表 2 所示。

通过比较功能验证实验与果实端响应实验结果,可以发现功能验证实验中果实加速度普遍大于果实端响应实验。这种差异可能源于实验环境的物理差异。实验室中截取的树枝与实际树体在固有频率等物理特性上存在差异。这体现了树体固有频率对采摘机激振效果的重要影响。此外,从能量传递角度分析,室内实验中,从采摘机到果实的能量传

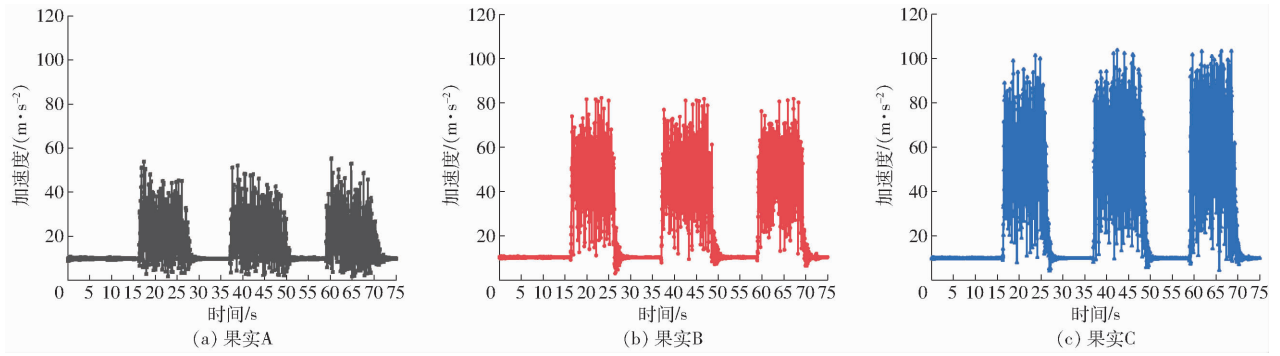


图9 各果实加速度-时间曲线

Fig.9 Acceleration - time curves of each fruit

表2 果实所受惯性力及其分量

Tab.2 Inertial force and its components on fruit N

参数	果实 A	果实 B	果实 C
惯性力平均值	3.236	4.908	6.197
切向力平均值	0.623	1.025	1.117
法向力平均值	3.164	4.680	5.193

递更高效,而室外实验中,更多的能量可能耗散在树体和激振平台之间。

图10为各果实的角速度-时间曲线。根据式(2)可计算各果实在激振过程中所受的法向力平均值,如表2所示。

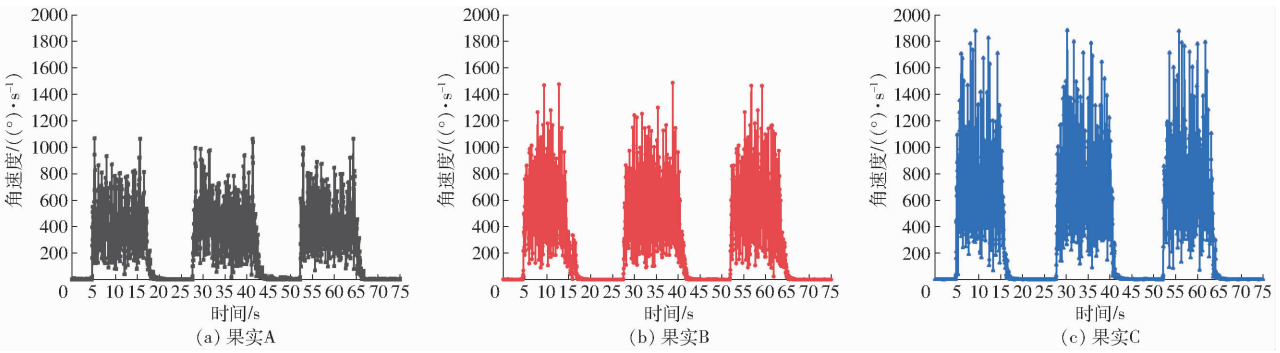


图10 各果实角速度-时间曲线

Fig.10 Angular velocity - time curves of each fruit

各果实角速度-时间运动曲线反映了果实沿果梗连接点法向振动的情况。不同于加速度响应,各果实角速度响应差值近似呈线性。果实A、B、C间隔相等,角速度响应峰值差值也是近似的,如表3所示。果实角速度峰值的出现也是随机、多次的,并不能确定果实在某一具体时间就会出现最大值响应,这与果实的加速度响应一致。

均值,如表2所示。各果实角加速度-时间运动曲线

表3 果实角速度

Tab.3 Fruit angular velocity (°)/s

参数	果实 A	果实 B	果实 C
角速度峰值	1 068.876	1 476.189	1 880.614
平均值	1 066.448	1 487.384	1 884.316
差值	1 066.029	1 464.514	1 878.692
平均值	1 067.118	1 475.029	1 881.207
差值		407.911	406.178

图11为各果实角加速度-时间曲线。根据式(1)可计算各果实在激振过程中所受的切向力平

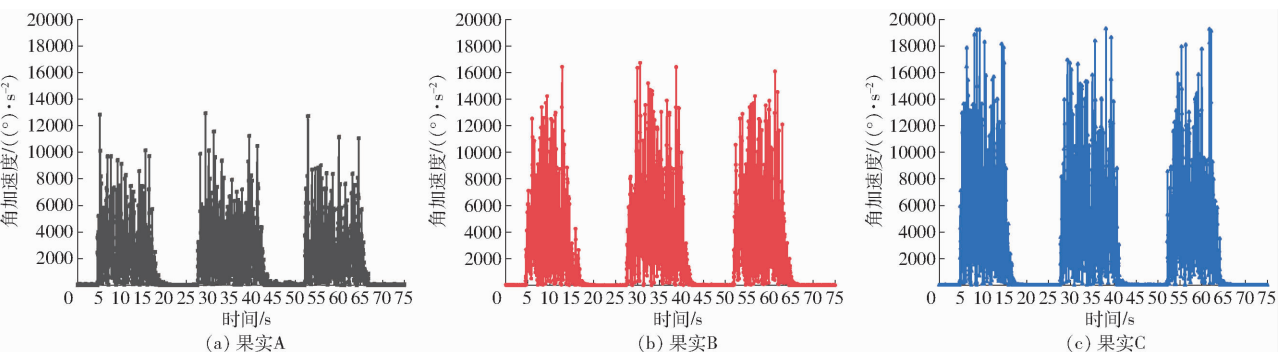


图11 各果实角加速度-时间曲线

Fig.11 Angular acceleration - time curves of each fruit

反映了果实相对于果梗连接点摆动的情况。果实角加速度响应表明,果实与分枝根部距离越远,果实角加速度越大,果实摆动频率越高。

比较果实所受的惯性力、法向力、切向力,可知法向力是造成果实脱落的主要因素,这与现有关于核桃脱落机制的研究一致^[27,29-30],表明果实在振动过程中主要做相对于果梗连接点的法向振动。果实运动响应是树体受迫振动与果实相对树体振动的复合运动。这两种运动的频率不同,导致果实运动响应是非周期性的。

另外,结合果实的振动响应,可发现如下规律:停止激振后,果实回归平衡状态所需的时间较长,振动衰减速度明显放缓。这表明果实的振动存在明显的阻尼,果梗在果实运动过程中吸收了部分能量。

4 结论

(1) 开发了一套电子果实系统,集成了多点同

步信息采集与模拟脱落功能,能够通过控制电磁铁通断来模拟果实脱落。系统利用支持蓝牙通信的惯性测量单元,与自主开发的上位机软件配合,实现了多点同步数据采集、数据整理、实时脱落判定及远程执行机构控制。通过模拟采摘实验,充分验证了本系统的功能可靠性。

(2) 多点同步测量技术揭示了同一树枝上不同位置的核桃果实达到加速度响应峰值存在时间迟滞现象。距树枝根部越近的果实越早达到惯性力峰值,但峰值也越小。

(3) 果实的响应运动是树枝的受迫摆动与果实相对于果梗连接点运动的复合效应。果实的脱落主要由其所受惯性力的法向分量引起,主要表现为沿法向的振动。

(4) 果实在做切向、法向振动时均存在明显的阻尼,表明果梗在果实的受迫振动过程中吸收了部分能量。

参 考 文 献

- [1] RABADÁN A, PARDO J E, GÓMEZ R, et al. Evaluation of physical parameters of walnut and walnut products obtained by cold pressing[J]. LWT,2018,91:308-314.
- [2] 曹诗诺,陈宇,韩泽玉,等. Plastein 反应修饰对核桃血管紧张素转化酶抑制肽活性及稳定性影响研究[J]. 食品与发酵工业,2023,49(21):109-115.
CAO Shinuo, CHEN Yu, HAN Zeyu, et al. Effect of Plastein reaction modification on activity and stability of walnut angiotensin I converting enzyme inhibitory peptides[J]. Food and Fermentation Industries,2023,49(21):109-115. (in Chinese)
- [3] 曹娜,夏飞. 我国核桃油产业创新发展机遇、挑战与实现路径[J]. 中国油脂,2023,48(10):6-10.
CAO Na, XIA Fei. Opportunities, challenge and implementation paths for innovation-driven development of walnut oil industry in China[J]. China Oils and Fats,2023,48(10):6-10. (in Chinese)
- [4] 仲军梅,刘玉梅. 核桃青皮的开发利用研究进展[J]. 食品工业科技,2014,35(19):396-400.
ZHONG Junmei, LIU Yumei. Status of development and utilization for green husk of walnut[J]. Science & Technology of Food Industry,2014,35(19):396-400. (in Chinese)
- [5] 龚赞辉,刘义汉,孙宇杰,等. 核桃采收机械的研究进展[J]. 南方农机,2023,54(19):15-17,28.
- [6] 孟佳,方晓璞,史宣明,等. 我国核桃产业发展现状、问题与建议[J]. 中国油脂,2023,48(1):84-86,103.
MENG Jia, FANG Xiaopu, SHI Xuanming, et al. Situation, problems and suggestions on the development of walnut industry in China[J]. China Oils and Fats,2023,48(1):84-86,103. (in Chinese)
- [7] HOU Junming, HE Zhenhui, LIU Deyu, et al. Mechanical damage characteristics and nondestructive testing techniques of fruits; a review[J]. Food Science and Technology,2023,43:18-23.
- [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] 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)
- [10] JIA Na, ZHANG Hangyu, GAO Hanshu, et al. Research hotspots and frontier prospects in the field of agroforestry picking robots in China—cite space bibliographic analysis[J]. Forests,2023,14(9):1847.
- [11] XING Shulun, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of the simulated electronic corn ear based on UWB/IMU technology[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2024,217:108567.
- [12] SUN Xingdong, WU Wangdi, CAO Chengmao, et al. Research on vibration response characteristics and separation deformation law of fruit-branch system[J]. AIP Advances,2023,13(6):065306.
- [13] 杜小强,李宏伟,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 Leiyong, 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)

- [14] 靳文婷,赵金辉,庄腾飞,等. 林果机械振动采摘理论与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊1):144-160.
JIN Wenting,ZHAO Jinhui,ZHUANG Tengfei, et al. Review on theory and equipment of mechanical vibration picking of forest fruits[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp.1):144-160. (in Chinese)
- [15] 吴道远,苏继龙,刘明财,等. 不同成熟度核桃振动采摘的最佳频率和振幅的研究[J]. 农机化研究,2018,40(9):28-33.
WU Daoyuan,SU Jilong,LIU Mingcai, et al. Vibration picking different maturity walnut optimal frequency and amplitude of the simulation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(9):28-33. (in Chinese)
- [16] 纪伟,何国志,徐博,等. 一种适用于苹果采摘机器人的柔性三指末端执行器采摘模式[J]. 农业工程学报,2024,14(1):102.
- [17] 林鑫章,雷金,任子超,等. 冻藏后沙棘果实的分离力与相关物理特性参数分析[J]. 新疆农业科学,2023,60(10):2479-2485.
LIN Xinzhang,LEI Jin,REN Zichao, et al. Study on physical parameters and biological characteristics of Xinjiang seabuckthorn fruit after frozen storage[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2023,60(10):2479-2485. (in Chinese)
- [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(1):55-64.
GUO Guanzhu,YANG Liyang,LUO Ya'nan, et al. Design and validation of pneumatic vibration walnut picking machine carried by UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):55-64. (in Chinese)
- [19] 曹佳乐,白晓鹏,徐道春,等. 核桃(*Juglans regia* L.) 脱落力基于低频振动响应的实验与分析[J]. 工业作物产品,2023,204(PA):117242.
- [20] SAVARY U S,EHSANI R,SALYANI M, et al. Study of force distribution in the citrus tree canopy during harvest using a continuous canopy shaker[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2011,76(1):51-58.
- [21] 谢承健,曹成茂,吴佳胜,等. 油茶果-果柄分离力测量装置设计与验证[J]. 食品与机械,2018,34(6):89-93.
XIE Chengjian,CAO Chengmao,WU Jiasheng, et al. Design and experiment of *Camellia oleifera* fruit-stalk separation force measuring device[J]. Food and Machinery,2018,34(6):89-93. (in Chinese)
- [22] 何昕孺,张曦燕,米佳,等. 枸杞果柄分离力与果实、果柄形态及内源激素含量间的关系[J]. 经济林研究,2019,37(1):100-106.
HE Xinru,ZHANG Xiyan,MI Jia, et al. Relationship of peduncle separation force in wolfberry with fruit, peduncle morphology and endogenous hormone contents[J]. Non-wood Forest Research,2019,37(1):100-106. (in Chinese)
- [23] 李义霞,鱼尚奇,郭众仲,等. 外源 IAA 对核桃内果皮生长发育的影响[J]. 果树学报,2024,41(5):941-955.
LI Yixia,YU Shangqi,GUO Zhongzhong, et al. Effect of exogenous IAA on the growth and development of walnut endocarp[J]. Journal of Fruit Science,2024,41(5):941-955. (in Chinese)
- [24] 鱼尚奇,张锐,郭众仲,等. 核桃内果皮硬化期生长素动态变化及差异表达基因分析[J]. 园艺学报,2021,48(3):487-504.
YU Shangqi,ZHANG Rui,GUO Zhongzhong, et al. Dynamic changes of auxin and analysis of differentially expressed genes in walnut endocarp during hardening[J]. Acta Horticulturae Sinica,2021,48(3):487-504. (in Chinese)
- [25] ZHOU Jiafeng,HE Long,KARKEE M, et al. Analysis of shaking-induced cherry fruit motion and damage[J]. Biosystems Engineering,2016,144:105-114.
- [26] 傅隆生,刘智豪,冯亚利,等. 基于高速摄影的冬枣果实振动脱落规律分析[J]. 中国农业大学学报,2018,23(8):135-141.
FU Longsheng,LIU Zhihao,FENG Yali, et al. Analysis of winter jujube fruit motion in vibration harvesting based on high-speed videos[J]. Journal of China Agricultural University,2018,23(8):135-141. (in Chinese)
- [27] HE Leiying,LIU Xiaochen,DU Xiaoqiang, et al. In-situ identification of shaking frequency for adaptive vibratory fruit harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2020,170:105245.
- [28] BOTH V,BRACKMANN A,LUDWIG V, et al. Dynamic and static drying temperatures for 'Barton' pecans: impacts on the volatile compounds profile and kernel color[J]. LWT,2022,161:113393.
- [29] 王荣炎,郑志安,徐丽明,等. 枸杞果实振动脱落特性模拟仿真及试验研究[J]. 农机化研究,2019,41(10):120-128.
WANG Rongyan,ZHENG Zhian,XU Liming, et al. Simulation and experiment on vibration characteristics of *Lycium barbarum* falling off[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2019,41(10):120-128. (in Chinese)
- [30] LIU Changyi,XU Daochun,CAO Jiale. Vibration response of walnuts under vibration harvesting[J]. Agronomy,2023,13(2):461.