

适用棚架树形的鲜苹果局部对靶振动收获方法研究

付函¹ 段洁利² 陈度^{1,3} 王新^{1,3} ZHANG Qin⁴ 王书茂^{1,3}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 华南农业大学工程基础教学与训练中心, 广州 510642;

3. 现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083; 4. 华盛顿州立大学精细与自动化农业系统中心, 普罗瑟 99350)

摘要: 目前, 苹果最新的栽培模式是将果树整形为树枝水平生长的多层棚架结构, 这种结构可以将机械收获控制在局部化的树枝水平, 以实现鲜苹果的机械化采收。为此, 提出一种实用的局部对靶振动收获方法, 激振树枝并采用尽量接近方式收集果实。基于单自由度粘弹性阻尼系统, 设计了树枝激振器, 并设计了一套计算机测控系统, 用于实时监控树枝的受迫振动频率。设计与激振树枝方式相对应的水平型和倾斜型果实收集平台。最后, 在美国华盛顿州普罗瑟附近的商业果园, 以“墙形”结构的“爵士”苹果为例, 开展了局部对靶振动收获试验, 对比分析了4种收集方式(有无缓冲隔离带、水平或倾斜接收)对果实质量的影响。依据美国农业部鲜苹果质量等级标准, 利用满足市场分级要求的果实所占的百分率对收获的果实质量进行评估。结果显示, 满足市场分级要求的果实所占的百分率为89.5%~96.3%, 且在这4种方式中并无显著差异。这表明, 针对苹果最新的栽培模式, 采用局部对靶振动收获方法是可行的。

关键词: 鲜苹果; 机械收获; 振动采收; 棚架树形

中图分类号: S225.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0001-07

Targeted Shake-and-catch Harvesting for Fresh Market Apples in Trellis-trained Trees

FU Han¹ DUAN Jieli² CHEN Du^{1,3} WANG Xin^{1,3} ZHANG Qin⁴ WANG Shumao^{1,3}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Engineering Fundamental Teaching and Training Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3. Beijing Laboratory of Modern Agricultural Equipment Optimization Design, Beijing 100083, China

4. Center for Precision and Automated Agricultural Systems, Washington State University, Prosser 99350, USA)

Abstract: Currently, fresh market apples are picked manually around the world, which requires a huge seasonal labor force to complete the job within the narrow harvest window. In addition, the shortage of skilled labor and high labor cost are increasing every year, which have threatened the sustainability of apple production. To address these issues, it is essential to develop mechanical harvest solutions for fresh market apples and other tree fruits. Shake-and-catch harvesting system offers an alternative solution to potentially obtain high harvest efficiency. Research on shake-and-catch harvesting for fresh market apples has been conducted for several decades. However, commercial machine is still unavailable. The crucial problem is that the damage rate and degree induced during harvesting is too high. Apple orchards in USA are being planted in modern trellis trained architecture, including formally trained horizontal limbs. The ready access to the limbs and fruit in formally trained orchard creates the potential for controlled localized fruit removal at the limb level. To verify the hypothesis that the newest apple tree canopies provide opportunities for targeted shaking and catching with minimal fruit damage, a new targeted shake-and-catch method was proposed. To realize this method, we developed a set of limb shaking device and corresponding capturing platform. A set of data acquisition system based on computer was also integrated to the shaking device to monitor and control the forced vibration frequency of a targeted limb. According to the capturing platform with/without separation buffer strips and horizontal/tilted capturing, four

收稿日期: 2017-07-17 修回日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51305445)和美国农业部基金支撑项目(1005756、1001246)

作者简介: 付函(1986—), 男, 博士生, 主要从事果品生产机械和农业装备智能测控技术研究, E-mail: zb1109062@cau.edu.cn

通信作者: 王新(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事农业装备智能测控技术研究, E-mail: wangxin117@cau.edu.cn

capturing patterns were tested in a commercial-grade ‘Jazz’ apple orchard (Prosser, Washington State, USA), in which trees were trained to a vertical fruiting wall architecture with seven layers. The harvesting test was conducted by shaking a tree limb and capturing the removal fruit right underneath the targeted limb. Each capturing pattern was involved in 20 samples, each of which including two adjacent limbs growing in a same layer of two trees. During testing, the shaking location was approximately at the middle of the targeted limb. Shaking frequency selected 20 Hz with 5 seconds duration time for all test; shaking amplitude of the device was 3.2 cm. According to USDA (United States Department of Agriculture) standards for fresh market apples, the fresh-market percentage was adapted to evaluate fruit quality. The percentage defined was that the number of apples satisfying fresh market grade divided by the capturing number in one sample shaking. Obtained results showed that fruit removal efficiency was around $(81 \pm 14.5)\%$ under the 20 Hz shaking frequency and 3.2 cm shaking amplitude; the fresh-market percentage in the four capturing patterns ranged from 89.5% to 96.3%; there was no significant difference in terms of the fresh-market percentage among the four capturing patterns. These results indicated that the targeted shake-and-catch harvesting method was feasible and showed a promise for mechanical solution for mass harvesting of fresh market apples; it could be permitted to adjust tilted angle within a certain range that couldn’t significantly affect fruit quality for the special trellis trained ‘Jazz’ apple trees.

Key words: fresh market apples; mechanical harvest; shake-and-catch harvest; trellis-trained tree

引言

振动式收获是将一定频率和幅值的激振力施加在果树的树干、冠层或树枝等不同位置,使大量果实极短时间内脱落,并同时采用恰当的机械装置收集这些果实,收获效率较高,在大面积、规模化的果品生产中具有较大潜力^[1-5]。目前国外已经出现了集自走平台、果实分离和收集装置于一体的成套式商品化振动式收获机械,用于收获像柑橘、橄榄、葡萄等表皮较厚、较硬或者用于加工处理的果品^[6-8]。许多研究者曾改装这些已经商品化的振动式收获机械,或者研制其他新型的收获机械,用于采收鲜苹果^[9-11]。然而,经过几十年的发展,目前市场上仍然没有商品化的鲜苹果收获机械,主要没有解决振动收获过程导致果实损伤率过大的难题,还无法将收获的果实质量控制在人工手摘的水平^[12-14]。

另一方面,苹果的栽培模式也在改善。由传统的多维结构,历经矮化、半矮化的三维密植种植模式,目前向着产量更高、更适合机械化收获的现代果园发展^[15-16]。当前,美国正在推广的新型苹果栽培模式有“墙形”和“V形”,整棵果树被整形为多层棚架结构,树枝则沿着棚架钢丝水平生长。这种结构可以将机械收获控制在局部化的树枝水平,尽量靠近树枝收集果实。由于降低了果实的跌落高度,所以在一定程度上减轻了跌落过程果实碰撞的力度,具有提高机械收获果实质量的潜力。

本文针对苹果最新的栽培模式,提出一种局部对靶振动采收方法,激振树枝并采用尽量接近方式收集果实,开发一套树枝激振装置和相应的果实收

集平台,研究这种方法采收鲜苹果的可行性,并对分析不同收集方式对采收果实质量的影响。

1 振动式果品收获机设计

目前,振动式果品收获机根据其工作原理,主要分为撞击式和惯性式。尽管撞击式可以在一定程度上减少果实碰撞的概率,但容易使果柄脱落,不利于果实的长期存储,不能满足鲜苹果的市场需求^[17]。惯性式收获机在当前应用较多,它通过将一定频率的激振力施加在树枝上,使树枝受到强迫力的作用而往复运动,当果实与所在枝条发生相对运动时,果实所受的惯性力大于果实与植株连接的结合力时,果实从它们结合的最弱处分离。本文在比较了2类收获方式特点的基础上,选择采用惯性式树枝激振装置。

1.1 树枝激振装置设计原理

由于果树结构比较复杂,如果将树枝作为一个连续弹性体来考虑其振动问题,需要无限多的自由度才能描述其振动状态。然而,多数条件下,这些结构可以简化成若干刚体通过弹簧联接而成,并且仍可以得到满意的结果^[18-19]。

为了便于研究树枝在外力下的振动问题,做如下假设:“树枝-机械”简化为单自由度系统,树枝受正弦变化的激振力,存在粘弹性阻尼。惯性式激振力通常采用旋转的偏心质量块或曲柄滑块机构来激励,并将旋转运动转换为直线往复运动,为树枝提供惯性力。

设偏心块的质量为 m , 偏心距为 r , 旋转角速度为 ω , 在某一时刻 t 产生的惯性力 F 为

$$F = mr\omega^2 \sin(\omega t) \quad (1)$$

另设“树枝-机械”系统的等效质量为 M , 刚度系数为 K , 阻尼系数为 C , 激振点相对平衡位置的位移为 x , 依据达朗贝尔原理, 激振点处的振动微分方程为^[20]

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx = F \quad (2)$$

联立式(1)和(2), 得到树枝的瞬时位移为

$$x = \frac{S}{2} \cos(\omega t - \theta) \quad (3)$$

对式(3)进行微分, 得到树枝的瞬时速度 v 和加速度 a 分别为

$$\begin{cases} v = \frac{dx}{dt} = -\frac{S\omega \sin(\omega t - \theta)}{2} \\ a = \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{S\omega^2 \cos(\omega t - \theta)}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中 S ——被振树枝的最大偏移量

θ ——相位角

当激振频率远大于系统的固有频率时, 则树枝的最大偏移量 S 为

$$S \cong \frac{2mr}{M} \quad (5)$$

式(5)表明, 采用惯性式振动收获时, 被振树枝的偏移量反比于激振机构偏心块的质量和偏心距, 正比于整套系统的等效质量。如果树枝偏移量过大, 有可能使树枝受损, 而偏移量太小, 又达不到果实分离的效果。根据“树枝-机械”系统的等效质量, 应选择合适的偏心块和偏心距, 做到两者兼顾。

式(2)中描述的激振力包含了偏心块自身所受的力, 树枝承受的激振力 F_1 应减去偏心块受的力

$$F_1 = F - ma =$$

$$m\omega^2 \left[\frac{S}{2} \cos(\omega t - \theta) + r \cos(\omega t) \right] \quad (6)$$

对式(6)微分, 可得到最大的激振力 F_{\max} 为

$$F_{\max} = mr\omega^2 \left[\left(\frac{S}{2r} \right)^2 + 1 + \frac{S}{r} \cos\theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

根据功率的定义, 使整个“树枝-机械”系统振动所需的瞬时功率 P_t 为激振力和振动速度的乘积, 公式表达为

$$P_t = Fv = mr\omega^2 \sin(\omega t) \left[-\frac{S\omega \sin(\omega t - \theta)}{2} \right] \quad (8)$$

一个周期 T 内的平均功率 P_a 为

$$P_a = \frac{\int_0^T P_t dt}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T mr\omega^2 \sin(\omega t) \left[-\frac{S\omega \sin(\omega t - \theta)}{2} \right] dt = \frac{mr\omega^2 S}{4} \sin\theta \quad (9)$$

在激振装置设计过程中, 其输出的最大扭矩也

是一项非常重要的参数, 对式(8)进行微分可得到所需的最大功率 P_{\max} 为

$$P_{\max} = \frac{mr\omega^3 S}{4} (\pm 1 - \sin\theta) \quad (10)$$

激振装置输出的最大扭矩 T_{\max} 为功率与角速度之比, 公式表达为

$$T_{\max} = \frac{mr\omega^2 S}{4} (\pm 1 - \sin\theta) \quad (11)$$

综上, 在设计激振器时, 需先确定系统的总质量, 再根据允许的最大偏移量, 选择合适的偏心块和偏心距, 然后根据树形的模态参数确定激振器的工作频率, 接着计算激振器的最大输出功率和扭矩, 并根据其选择合适的动力装置, 最后设计相应的传动和夹持机构进行结构集成。

1.2 树枝激振装置结构组成与工作原理

为保证激振器的可靠性并缩短研发周期, 激振器由电动往复锯(美国密尔沃基电动工具公司, 型号为 2720)改装而成, 振幅 3.2 cm, 工作频率上限 50 Hz, 最大工作电压 18 V, 最大输出功率 162 W。改装后的激振器如图 1 所示, 该激振器电动机提供所需的动力, 经曲柄滑块机构将电动机的旋转运动转化为直线往复运动。

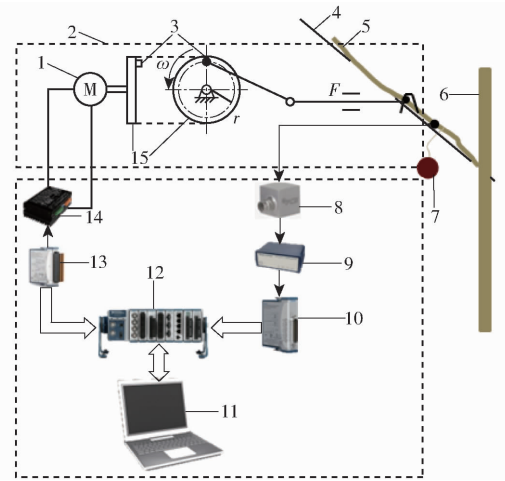


图 1 激振装置结构示意图

Fig. 1 Schematic of the construction of the developed limb shaking device

1. 直流电动机 2. 激振器 3. 偏心块 4. 棚架钢丝 5. 树枝
6. 苹果 7. 树干 8. 加速度传感器 9. 信号调理器 10. 数字测频模块 11. 计算机加测控软件 12. DAQ USB 机箱 13. 模拟输出模块 14. 电动机驱动器 15. 转盘

此外, 为实时监控树枝的受迫振动频率, 使其保持一致, 还设计了一套计算机测控系统, 如图 1 所示。系统硬件主要由加速度传感器(美国 PCB 公司, 型号 356A02)、信号调理器(美国 PCB 公司, 型号 482C05)、数字测频卡(美国国家仪器公司, 型号 9401)、数字输出卡(美国国家仪器公司, 型号

9375)、Compact DAQ USB 机箱(美国国家仪器公司,型号 9178)和计算机组成。系统软件由 Labwindows/CVI 2010 开发而成。

试验时,将加速度传感器固定在被振树枝上,紧挨激振点,用于采集树枝的受迫振动信号;采集的信号经信号调理器后,通过数字测频卡测量被振树枝受迫振动的频率,经 USB 机箱传输到计算机中的测控软件,然后与设定的目标频率进行比对,将偏差值经 PID 控制算法处理后,经模拟输出卡进行数模转换,再经驱动器放大后,用于调节电动机转速。

1.3 树枝激振装置收集平台

在振动收获中,收集平台用于接收短时间内从树枝上分离的大量果实,并尽可能减少果实碰撞造成的损伤,其减损机制是利用缓冲材料吸收果实的部分冲击动能并增加碰撞部位的接触面积,并利用缓冲分隔或减速部件避免果实之间直接碰撞或减少碰撞力。

图 2 为设计的果实收集平台技术原型机的三维效果图,包含水平型和倾斜型。该收集平台主要由木质框架、果实收集区、底部缓冲板、缓冲隔离带和减速缓冲条等元部件组成。收集平台的整体宽度略小于相邻两棵果树的行内间距,以尽可能多地收集果实。倾斜型的角度参照了前期的试验结果,在此角度下可以获得较高比例的优质果实^[21]。

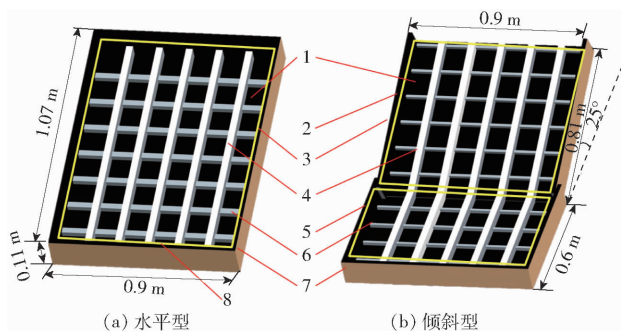


图 2 果实收集平台技术原型机效果图

Fig. 2 Technical prototypes of fruit capturing platform

1. 底部缓冲板 2. 倾斜接收区 3. 侧边缓冲条 4. 缓冲隔离带
5. 果实汇聚区 6. 减速缓冲条 7. 木质框架 8. 水平接收区

目前,在水果运输包装中,常用的缓冲材料有瓦楞纸板和泡沫塑料,由于纸板受湿度影响较大、过载复原性较差,不易在室外使用,所以结合材料自身的性质和前期苹果碰撞损伤响应试验,选择了聚氨酯泡棉作为收集平台的底板缓冲材料。材料的 25% 形变压力为 9.1 ~ 11 kPa,密度 48.1 kg/m³,厚度 19 mm,能够确保 0.5 m 高的果实跌落后无损伤,并且这些材料具有极佳的吸能特性。另外,为降低转移过程果实之间碰撞的力度或者避免直接碰撞,在底板泡棉上又增加了 5 条同类型较低压力的缓冲隔

离带和一些减速缓冲条。根据果实的尺寸,设计的相邻隔离带和减速条间距均在 0.1 m 左右。

2 田间试验与结果分析

试验目的是针对苹果最新的栽培模式,利用开发的树枝激振装置和果实收集平台,验证局部对靶振动方式采收鲜苹果的可行性,重点对比不同收集方式对果实质量的影响。

2.1 试验条件及方法

在 2016 年 9 月的苹果收获季,于美国华盛顿州普罗瑟(Prosser, WA, USA)附近的一个商业果园开展了田间试验。苹果种类为“爵士”(Jazz),其栽培模式为“墙形”。如图 3 所示,整棵果树被钢丝棚架为 7 层,树枝沿着棚架钢丝水平生长,相邻两层钢丝间距约为 0.43 m,果树行内间距约为 1.4 m,行间间距约为 2.6 m。选用果树的 2 ~ 4 层为试验对象,该范围内的树枝直径为 1.5 ~ 3.0 cm。

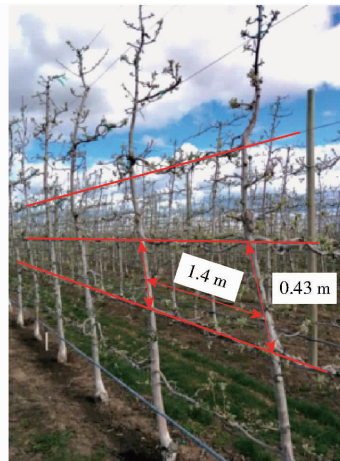


图 3 “墙形”结构的“爵士”苹果树

Fig. 3 “Jazz” apple trees with fruiting wall architecture

为对比不同收集方式对果实质量的影响,将水平和倾斜型收集平台根据其表面是否有缓冲隔离带,开展了 4 种收集方式的试验工作,即:带隔离水平收集(方式 1)、无隔离水平收集(方式 2)、带隔离倾斜收集(方式 3)和无隔离倾斜收集(方式 4)。每种方式重复 20 个样本,每个样本包含相邻两棵树干之间同层的 2 根树枝。每种收集方式包含的果实数量分布如图 4 所示。

试验方案如图 5 所示,采用的是激振树枝并尽量靠近接收的局部对靶振动收获方式。试验时,先将铝型材支撑的收集平台水平放置在被激振树枝的正下方,调整好位置,在树枝的中部附近选择合适的激振点,参照前期的收获试验^[24],以较高果实分离率下的 20 Hz 的频率进行振动,时间约为 5 s,然后保持收集平台位置不变,再振动同层的另一根相邻树枝,最后将果实从收集平台取出,再收获下一个树

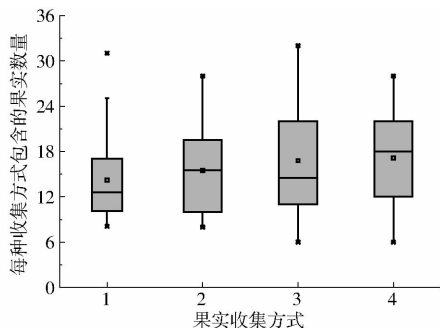


图4 果实数量在4种收集方式中的分布箱图

Fig. 4 Boxplot of the amount of fruit distributes in the four capturing patterns

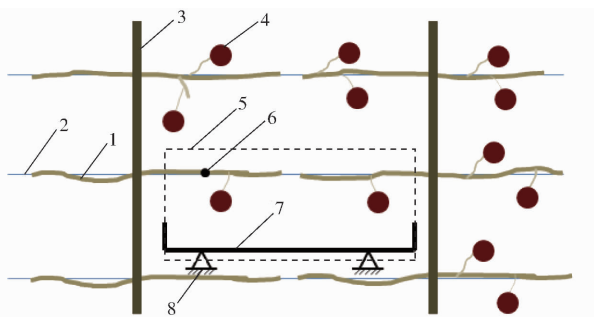


图5 局部对靶振动收获试验方案

Fig. 5 Schematic of a localized harvesting test for "Jazz" apple tree with fruiting wall architecture

1. 树枝 2. 棚架钢丝 3. 树干 4. 苹果 5. 局部收获区 6. 激振点 7. 收集平台 8. 收集平台支撑架

枝样本。

2.2 果实质量评估

试验当天,将收获的果实小心运到室内条件(温度为 22°C ,湿度为 60%)储藏,24 h之后查看果实质量情况。先肉眼查看果实表皮有轻微褐变或被压平的部位,然后用手指触摸核查这些部位是否已经软化,最后用游标卡尺测量损伤部位(可以近似看作椭圆形)的最大和最小直径。果实质量的评估指标包括果实无损率和满足美国农业部鲜苹果标准^[22-23](表1)中规定的各质量等级所占的百分率。如有果实在收获过程中被枝条戳伤,将作为数据异常点剔除。另外,影响果实质量的其他因素,如果实尺寸、质量和颜色,也不在本研究范围。

表1 果实质量等级划分

Tab. 1 Classification of apple bruising damage

果实质量等级	损伤说明
超特级	单处碰压伤直径不超过 12.7 mm 或多处累计损伤面积不超过 127 mm^2
特级	单处碰压伤直径不超过 19 mm 或者多处损伤面积不超过 285 mm^2
未分级	其他碰压伤

果实无损率定义为收集平台接收到的果实中没

有损伤的数量与剔除异常剩余的数量之比,用公式表述为

$$\eta_n = \frac{N_n}{N_c - N_o} \times 100\% \quad (12)$$

式中 N_n ——无损的果实数量

N_c ——收集平台接收到的果实总数

N_o ——异常果实数量

满足表1中规定的各果实质量等级所占的百分率也采用类似式(12)计算。

此外,本文也计算了果实的分离率和收集率用作参考,分别定义为通过振动从树枝样本上分离的果实数量与被激振树枝上生长的果实总数之比,以及被收集平台接收的果实数量与通过振动从树枝样本上分离的果实数量之比。

2.3 试验结果与分析

在 20 Hz 激振频率下,果实分离率为 $(81.1 \pm 14.5)\%$,与前期的 $(85.9 \pm 11.7)\%$ 很接近,并无显著差异,仍有较大的提升空间;果实收集率为 $(94.3 \pm 7.6)\%$,基本达到试验要求。

接下来分析果实无损率均值在这4种收集方式中的分布,如图6所示,在无隔离水平收集方式中最高(77.8%),在无隔离倾斜收集方式中最低(68.3%),但在这4种收集方式中无显著差异。总体来看,水平收集方式比倾斜收集方式下的果实无损率高。由于果实是随机生长在树枝上,当树枝受迫振动时,果实受惯性力和振动能量的作用做不规则运动,最后随机分离,分散地跌落在收集表面(图7),而在倾斜收集方式下,果实跌落到收集表面后靠重力作用要向下滚动,转移过程与后跌落的果实发生了碰撞,这可能是果实无损率在水平收集方式下较高的主要原因。

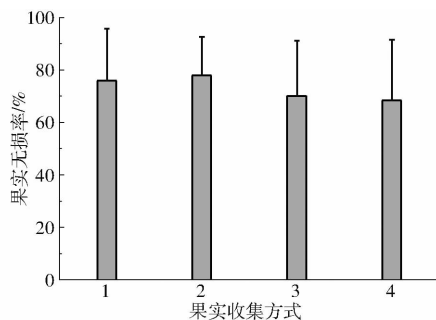


图6 果实无损率均值在4种收集方式中的分布

Fig. 6 Average percentages of bruising-free fruit in the four capturing patterns

根据美国农业部鲜苹果市场质量等级标准,满足“超特级”、“特级”和“未分级”的果实所占的百分率在这4种收集方式中的分布如图8所示。图中显示,满足超特级的果实所占的百分率在无隔离倾



图7 水平收集方式下的果实跌落分布实例

Fig.7 An illustration of apple fruit falling distribution in horizontal capturing pattern

斜收集方式中最低(80.3%),在无隔离水平收集方式中最高(85.6%),两个中间值分别为82.7%和84.1%,这与果实无损率在这4种收集方式中的分布一致。然而,满足每个质量等级要求的果实所占的百分率在这4种收集方式中均无显著差异。图8还显示,在所有质量等级中,满足超特级的果实所占的百分率均是最高。图8还显示,满足特级质量等级要求的果实所占百分率在带隔离倾斜收集方式中最高(13.4%),这可能由于果实在此接收角度(25°)下受减速缓冲条的阻碍作用,增加了接收或转移过程果实之间相撞的几率。因果实之间相撞后而仍满足“超特级”质量等级要求所允许的冲击力很小,所以相撞后的果实只能降为特级。然而,无论满足超特级还是特级的果实,都能满足鲜果市场质量等级的要求,这个比例为89.5%~96.3%,这些结果表明采用局部对靶振动收获方式是可行的,具有推广应用前景。

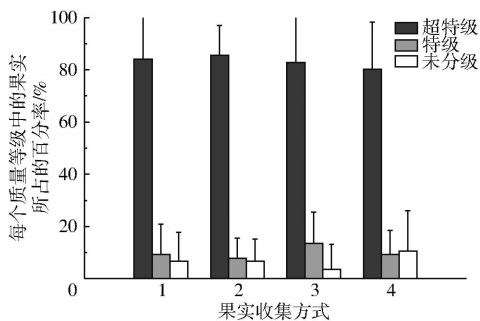


图8 满足3种质量等级的果实所占百分率在4种收集方式中的分布

Fig.8 Distribution of percentages of fruit satisfying each quality categories in the four capturing patterns

未分级果实无法满足鲜果市场等级的要求,出现的原因可能由于在收集及转移过程果实与激振器的刚性伸缩杆或者其他果实发生的单次碰撞使其损伤直径超过了19 mm,或者多次碰撞,导致累积损伤面积超过了 285 mm^2 。因此,为提高果实质量,在今后的试验中需要为激振器包裹缓冲材料,以提高果实抵抗冲击损伤的能力^[24-25];另一方面,通过研究

果实之间的碰撞发现,果实相撞之后很容易损伤并且使果实满足高质量等级所允许的冲击力很小^[26],所以为了减少果实损伤,很有必要为收集平台增加缓冲隔离机构。然而,本文提出的这种增加缓冲隔离带的方式并没有起到明显减少果实损伤程度的作用,所以还需研究其他方式。

另外,从本文试验的目的和结果看,满足各质量等级要求的果实所占百分率在这4种收集方式中均无显著差异,而这些结果表明,无论是在收集平台内增加一定尺寸数量的缓冲隔离带,还是在一定范围改变平台的接收倾角,均不能明显提高高质量果实所占的百分率。造成这种结果的主要原因可能与树形结构、树枝样本中的果实数量以及本文采用的振动收获方式有关,就试验的“爵士”苹果而言,其栽培模式为最新的“墙形”(图3),树枝被棚架为水平生长,一个树枝样本一般包含10~30个果实(图4),这些果实随机分散在约1.5 m长的两棵果树之间。由于试验采用的局部对靶振动收获方式是以树枝为激振对象并且以尽量接近方式收集,一方面将果实收获水平降低在树枝水平,减少了果实同时分离的数量,可以在很大程度上减少果实与树枝之间跌落过程造成的碰撞,并且通过降低果实跌落高度,降低了果实与接收面或果实之间碰撞产生的冲击力,从而减轻果实损伤程度;另一方面因果实数量密度(单位长度内果实的数量)较低,在振动过程发生果实之间碰撞的概率也比较低。

综上所述,针对苹果最新的栽培模式,根据试验结果证实采用局部对靶振动收获方式收获树枝水平生长鲜苹果是可行的,具有推广应用的潜力。结合前期室内试验及本次室外的试验分析发现,在收集过程果实之间碰撞造成的损伤是果实损伤的主要来源,所以在今后局部对靶振动收获方式的研究中,可以重点放在如何设计恰当的果实分隔或缓冲机构,以提高整体的果实收获质量。

3 结论

(1)针对苹果最新的栽培模式,提出了激振树枝并采用尽量靠近方式收集果实的局部对靶振动收获方法。基于单自由度系统设计了激振器,开发了一套包括计算机测控系统的激振装置;研制了水平型和倾斜型激振树枝果实收集平台。利用开发的激振装置和收集平台,在美国华盛顿州普鲁瑟棚架为“墙形”的“爵士”商业果园开展了局部对靶振动收获试验,对比了4种收集方式对果实质量的影响。

(2)利用开发的激振装置和收集平台验证了局部对靶振动收获方式是可行的。依据美国农业部鲜

苹果市场质量分级标准,有 89.5% ~ 96.3% 的果实达到市场分级标准。

内改变收集平台的倾角,而这并不会显著影响收获的果实质量。满足各果实质量等级所占的百分率在水平型和倾斜型收集方式中并无显著差异。

(3)在局部对靶振动收获中,可以在一定范围

参 考 文 献

- 1 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)
- 2 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)
- 3 CHEN D, DU X, ZHANG Q, et al. Performance evaluation of mechanical cherry harvesters for fresh market grade fruits[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2012,28(4): 483-489.
- 4 ZHOU J, HE L, ZHANG Q, et al. Effect of excitation position of a handheld shaker on fruit removal efficiency and damage in mechanical harvesting of sweet cherry[J]. Biosystems Engineering, 2014,125: 36-44.
- 5 HE L, FU H, KARKEE M, et al. Effect of fruit location on apple detachment with mechanical shaking [J]. Biosystems Engineering, 2017,157: 63-71.
- 6 GUPTA S K, EHSANI R, KIM N H. Optimization of a citrus canopy shaker harvesting system: mechanistic tree damage and fruit detachment models[J]. Transaction of the ASABE, 2016,59(4):761-776.
- 7 杨兰涛,王丽红,坎杂,等. 4PZ-1型自走式酿酒葡萄收获机的研制与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(1):38-44.
YANG Lantao, WANG Lihong, KAN Za, et al. Development and test of 4PZ-1 self-propelled wine grape harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 38-44. (in Chinese)
- 8 SOLA-GUIRADO R R, CASTRO-GARCÍA S, BLANCO-ROLDÁN G L, et al. Traditional olive tree response to oil olive harvesting technologies[J]. Biosystems Engineering, 2014,118: 186-193.
- 9 PETERSON D L, MILLER S S, WHITNEY J D. Harvesting semidwarf freestanding apple trees with an over-the-row mechanical harvester[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1994,119(6): 1114-1120.
- 10 PETERSON D L, BENNEDSEN B S, ANGER W C, et al. A systems approach to robotic bulk harvesting of apples [J]. Transactions of the ASAE, 1999,42(4): 871-876.
- 11 DE KLEINE M E, KARKEE M. A semi-automated harvesting prototype for shaking fruit tree limbs [J]. Transactions of the ASABE, 2015,58(6): 1461-1470.
- 12 PETERSON D L. Harvest mechanization progress and prospects for fresh market quality deciduous tree fruits [J]. Hort Technology, 2005,15(1): 72-75.
- 13 ZHANG Z, HEINEMANN P H, LIU J, et al. The development of mechanical apple harvesting technology: a review [J]. Transactions of the ASABE, 2016,59(5): 1165-1180.
- 14 MA S, KARKEE M, FU H, et al. Air suspension-based catching mechanism for mechanical harvesting of apples [J]. IFAC-Papers On Line, 2016,49(16): 353-358.
- 15 MARSHALL D W, ANDREWS P K. Trends in Washington State's apple industry [J]. Hort Technology, 1994,4(1): 6-15.
- 16 ROBINSON T L, LAKSO A N, REN Z. Modifying apple tree canopies for improved production efficiency [J]. Hort Science, 1991,26(8): 1005-1012.
- 17 PETERSON D L, WOLFORD S D. Fresh-market quality tree fruit harvester part II: apples [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003,19(5): 545-548.
- 18 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, 2008,22(6): 795-802.
- 19 LÁNG Z. A one degree of freedom damped fruit tree model [J]. Transactions of the ASAE, 2008,51(3): 823-829.
- 20 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.
- 21 HE L, FU H, SUN D, et al. Shake-and-catch harvesting for fresh market apples in trellis-trained trees [J]. Transactions of the ASABE, 2017,60(2): 353-360.
- 22 PETERSON D L, TABB A L, BAUGHER T A, et al. Dry bin filler for apples [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2010,6(4): 541-549.
- 23 USDA Agricultural Marketing Services. United States standards for grades of apples [S]. 2002.
- 24 FU H, HE L, MA S, et al. 'Jazz' apple impact bruise responses to different cushioning materials [J]. Transactions of the ASABE, 2017,60(2): 327-336.
- 25 王为,李小昱. 缓冲材料降低苹果碰撞损伤的试验研究 [C] // 第六届全国包装与食品工程学术年会论文集,哈尔滨, 2002:132-136.
- 26 FU H, HE L, MA S, et al. Bruise responses of apple-to-apple impact [J]. IFAC-Papers On Line, 2016,49(16): 347-352.