

振动式蓝莓采摘机对果实收获的影响试验

鲍玉冬^a, 李志鹏^{b*}, 郭艳玲^a, 王海滨^a

(东北林业大学 a.机电工程学院; b.交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:以‘蓝丰’蓝莓为研究对象,建立了蓝莓果实振动模型和果树振动系统模型。以蓝莓与母枝的结合力作为采摘力对模型求解,确定果实适宜收获的振动频率约为 24 rad/s 时,可提高采摘效率,降低青果脱落率。利用该振动频率,使用东北林业大学自主研发的 GYL062 型牵引振动式蓝莓采摘机在蓝莓集中成熟的季节进行采摘试验,得到适宜振动频率下机械采摘的工作效率为 7.17 kg/min,是人工采摘效率的 10 倍,青果脱落率约为 5.6%,果实损伤率约为 8.0%,树枝总体损伤率约为 30%。

关键词: 蓝莓; 振动; 采摘力; 采摘机

中图分类号: S225.93

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2014)01-0096-05

Effects of vibrating based picking machine on blueberry fruit harvest

BAO Yu-dong^a, LI Zhi-peng^{b*}, GUO Yan-ling^a, WANG Hai-bin^a

(a.College of Mechanic and Electronic Engineering; b.Traffic College, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Blueberry cultivar Bluecrop was used to establish the vibrating system model for blueberry fruit and blueberry tree. Picking force between the fruit and the branch was used to solve the vibrating models. The calculated suitable vibration frequency for fruit harvesting is 24 rad/s, at which picking efficiency is improved and fallen rate of green fruit is reduced. The vibrating based blueberry picking machine GYL062, which is developed by Northeast Forestry University, was used to harvest blueberries in their mass mature period. Under the calculated suitable vibration frequency, the efficiency of picking was 7.17 kg/min, which was ten times as high as that by handpicking, with fallen rate of green fruit being 5.6%, damage rate of fruit 8.0% and total damage rate of branches 30%.

Key words: blueberry; vibrating; picking force; picking machine

美国作为蓝莓^[1-5]原产国,最早研制出振动式蓝莓采摘机。美国在植株振动模型方面所作的大量研究,主要是针对乔木果树进行的。国内蓝莓的机械化采收尚处在起步阶段^[6-9],现有的浆果采收机械并不适于蓝莓采摘。

‘蓝丰’系美国蓝莓品种,果实颗粒大、肉质硬,中熟,树体为灌木高丛,生长健壮,开张,适合振动式蓝莓采摘机作业,抗旱、连续丰产能力强,中国已引进广泛种植。笔者在对‘蓝丰’蓝莓果树

的研究中,将果树简化为果实、果柄和树枝系统与树体和树根系统,建立果实振动力模型和果树振动系统模型,通过采摘力的分析,对模型求解,得到采摘适宜的振动频率,并使用东北林业大学自主研发的 GYL062 型牵引振动式蓝莓采摘机进行采摘试验,以期提高采摘机的采摘效率,降低青果的脱落率,减少振动采摘对枝条和果实的损伤,提高蓝莓采摘机工作的适应性。

收稿日期: 2013-07-11

基金项目: 国家林业局“948”项目(2011-4-21)

作者简介: 鲍玉冬(1986—),男,辽宁抚顺人,博士研究生,主要从事机电一体化技术和农林采摘机及机器人研究,fnbaoyudong@163.com;

*通信作者, lizp386@sohu.com

1 蓝莓果树振动模型的建立

振动式采果是将采摘机产生的机械振动力传递给果树，果树树枝在接受强迫振动力后，以一定的频率和振幅振动，树枝上的果实通过振动加速运动。当加速运动的果实受到的惯性力大于果实与树枝之间的结合力时果实掉落^[3,6]。通过果树振动模型分析果树在振动过程中的响应特性^[8-9]，可确定果实收获的适宜的振动频率。

蓝莓果树形态大小及果实大小存在差异，以‘蓝丰’品种为对象，对蓝莓果实、果柄及树枝系统、树体与树根系统建模及求解。

1.1 果实振动力模型

蓝莓果实生长在树枝的最末端，因此果实振动力模型包括果实、果柄和与果柄相连的副枝。蓝莓生长的空间分布以及振动机构的执行，不能使所有的蓝莓果实全部受到相同的振动力的作用，未受到振动力直接作用的树枝，会在其他树枝所产生的振动影响下，在同一果树树枝之间的相互约束条件下相应地产生振动^[10]。由于振动式采摘对果树产生的振动是接触和持续的，所以近似认为采摘过程中果树的振动频率即为振动器的振动频率。

设定振动过程中，长有果实的副枝不发生扭转变形。果实悬挂点处的惯性力，分为垂直于果柄的切向分力和沿着果柄的法向分力。切向分力使得果柄发生弯曲变形，对果实的采摘不产生影响，所以只考虑使果柄产生轴向拉力的法向分力。

将强迫振动、树枝的振动和果实的振动简化在同一平面内，这样树枝、果实和果柄的运动系统即可简化为 1 个运动的单摆系统^[11]，建立如图 1 所示的坐标系，用拉格朗日法分析摆的运动微分方程。

由图 1 几何关系可知，果实在 xoz 坐标系下的绝对坐标为：

$$x = x_0 + x' = x_0 \pm l \sin \theta \tag{1}$$

$$z = z_0 + z' = z_0 + l \cos \theta \tag{2}$$

单摆系统的动能方程为：

$$T = \frac{1}{2} m [\dot{x}_0^2 + \dot{z}_0^2 + l^2 \dot{\theta}^2 - 2l(\dot{x}_0 \cos \theta + \dot{z}_0 \sin \theta) \dot{\theta}] \tag{3}$$

式中： T 为动能(J)； \dot{x}_0 为悬挂点在 x 方向的速度(m/s)； \dot{z}_0 为悬挂点在 z 方向的速度(m/s)； $\dot{\theta}$ 为摆角速度(rad/s)。

单摆系统的势能方程为：

$$V = -mgz' = -mgl \cos \theta \tag{4}$$

式中： V 为势能(J)； g 为重力加速度(N/m²)。

导入拉格朗日方程，得：

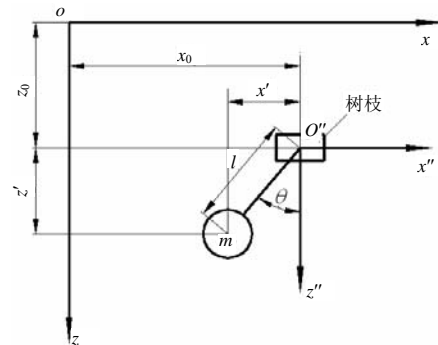
$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l} \sin \theta - \frac{(\ddot{x}_0 \cos \theta + \ddot{z}_0 \sin \theta)}{l} = 0 \tag{5}$$

式中： $\ddot{\theta}$ 为角加速度(rad/s²)； \ddot{x}_0 为悬挂点在 x 方向的加速度(rad/s²)； \ddot{z}_0 为悬挂点在 z 方向的加速度(rad/s²)。

(5)式表示按任意规律移动的树枝上的摆的位置。假设果实悬挂点处在水平面内按简谐规律运动，则：

$$\theta = Av^2 l^{-1} (\omega^2 - \nu^2)^{-1} (\sin \nu t - \nu \omega^{-1} \sin \omega t) \tag{6}$$

式中： ω 为自由振动圆周率(rad/s)； A 为强迫振动的振幅(m)； ν 为强迫振动频率(rad/s)； t 为时间(s)。



xoz 为悬挂点绝对坐标系； $x'o'z''$ 为质心相对坐标系； x_0 为悬挂点 x 方向坐标(m)； z_0 为悬挂点 z 方向坐标(m)； x' 为质心 x'' 方向坐标(m)； z' 为质心 z'' 方向坐标(m)； m 为果实质量(kg)； l 为摆长(果柄长，m)； θ 为摆角(rad)。

图 1 悬挂点在移动下的物理摆

Fig.1 Physical pendulum with the suspension point moving

由(6)式可知，果实的振动由自由振动和强迫简谐振动 2 部分组成。

小浆果在脱落时，其自振频率远小于强迫振动频率^[15]，因此令 $\omega = 0$ ，则：

$$F_n = ml\dot{\theta}^2 = ml(A l^{-1} \nu \cos \nu t)^2 \tag{7}$$

式中： F_n 为惯性力沿果柄方向的法向分力(N)。

通过分析可知，在振动采摘过程中，果实、果柄和副枝系统相当于 1 个运动的单摆系统，摆动中的果实的果柄受到的轴向拉力达到果实和果柄之间的结合力时使果实脱落。由(7)式可知，轴向拉力的大小与果实质量和外加强迫振动的频率有关。

1.2 果树振动系统模型

蓝莓采摘机为接触式旋转振动收获机，将旋转

振动器深入植物冠层内, 击打和梳刷果实, 使果树产生振动^[12-14]。假设由旋转振动器产生的惯性力为 $M_s r v^2 \sin vt$, 可以得到连续式收获系统的动力学方程:

$$M_i \ddot{x}_M + k \dot{x}_M + \frac{1}{c} x_M = M_s r v^2 \sin vt \quad (8)$$

$$M_i = M + M_s \quad (9)$$

式中: x_M 为果树振动水平方向的位移(m); \dot{x}_M 为果树振动水平方向的速度(m/s); \ddot{x}_M 为果树振动水平方向的加速度(m/s²); M_i 为等效质量(kg); M 为果树等效质量(kg); M_s 为振动器等效质量(kg); r 为振动器旋转半径(m)。

由(8)式, 得:

$$A_x = \frac{M_s r v^2}{\sqrt{\left(\frac{1}{c} - M_i v^2\right)^2 + (k v)^2}} \quad (10)$$

式中: A_x 为树枝在水平方向上的振幅(m); c 为树枝的弹性系数(m/N); k 为黏性阻尼系数(Ns/m)。

果树力学模型的建立过程中, 常将果树系统假设为单自由度系统, 且具有一致的物理性。果树系统相对复杂, 为了便于分析, 将果树分为树枝-果实、主根-土壤和树冠 3 个部分^[15]。果树在振动时, 土壤中的主根也随着整个系统振动, 并随之消耗一部分输入的振动能量^[16-17]。提出一种果树模型^[18-20], 该果树振动模型简化后包括叶、果实及树干等效质量(果树等效质量)和树根等效质量 2 部分, 如图 2 所示。

参考文献[19], 经过分析和计算得出的黏性阻尼系数, 得:

$$k(y) = \frac{(R-H)^2 + a^2}{(h+R)^2} k_{def} \quad (11)$$

式中: k_{def} 为黏性阻尼系数理论值(Ns/m); R 为果树旋转半径(m); h 为等效振动力距地面的距离(m); H 为根部等效质量中心距地面的距离(m); a 为根部等效质量中心距旋转中心的距离(m)。

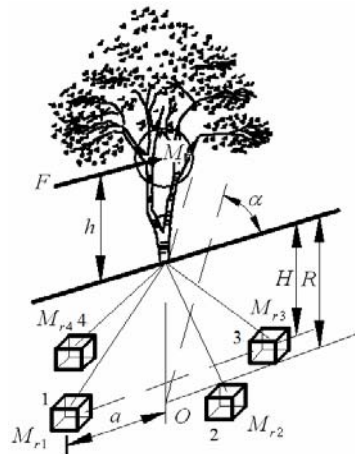
根据弹性系数计算公式^[19], 得:

$$c(y) = \frac{c_{def}}{2} \frac{(h+R)^2}{(R-H)^2 + a^2} \quad (12)$$

式中: c_{def} 为弹性阻尼系数理论值(m/N)。

根据果树振动旋转半径计算公式^[19], 得:

$$R = \frac{a^2}{h+H} \quad (13)$$



M 为树体等效质量(kg); M_{r1} 为树根在位置 1 处等效质量(kg); M_{r2} 为树根在位置 2 处等效质量(kg); M_{r3} 为树根在位置 3 处等效质量(kg); M_{r4} 为树根在位置 4 处等效质量(kg); F 为等效振动力(N); α 为果树旋转角度(rad); O 为果树旋转中心。

图 2 果树振动模型

Fig.2 Vibrating model of fruit tree

通过分析可知, 果树振动系统包括树体和树根 2 部分。对振动果树系统, 除了考虑树体接受振动以外, 还要考虑树根需要吸收一部分能量。参考公式(11~13), 树体和树根吸收的能量与树体和树根的质量分布、树根结构分布和作用力位置有关。

2 振动采摘力分析

2.1 振动采摘力的产生

东北林业大学自主研发的振动式蓝莓采摘机(型号为GYL062)为龙门式车体, 车体内部安装振动指排, 依靠液压马达驱动曲柄摇杆机构, 带动双侧指排同时振动, 通过调节液压马达转速调节振动频率。由华苑牌 350 型拖拉机牵引作业。振动采摘机构作用于果树, 指排(即振动棒)直接插入树冠使其传递振动, 产生的采摘力使果实与树枝分离^[15]。

2.2 振动频率的确定

通过对‘蓝丰’果树的生物特性测量可知, 蓝莓果实平均质量 0.002 6~0.003 3 kg, 果树质量平均为 10 kg; H 、 h 和 a 分别平均为 0.15、0.85、0.25 m, 果柄平均长为 0.02 m; 熟果、青果和叶与母枝的结合力平均分别为 0.7、1.2、1.7 N。

采摘力大小可以设置为沿着果柄方向的惯性力大小, 该惯性力大小即为熟果与母枝的结合力 0.7N, 该力小于青果和叶与母枝的结合力, 在该采摘力作用下, 熟果脱落, 青果与叶不脱落, 此时果

树的振动频率即为采摘振动的适宜频率。

参照文献[18-20], 取 $k_{def}=9\ 850\ \text{Ns/m}$, $c_{def}=6\times 10^{-6}\ \text{m/N}$, 取振动器质量 $M_s=10.4\ \text{kg}$, 振动器旋转半径 $r=1\ \text{m}$ 。结合蓝莓生物学特性数据, 通过式(7)、(10)、(11)、(12)、(13)计算得到熟果掉落的强迫振动频率 $\nu=24\ \text{rad/s}$ 。

3 采摘试验

3.1 试验指标

为检验振动模型是否有效及采摘力的理论分析是否能达到预期效果, 对比不同振动频率下的采摘效率和青果脱落率。由于果树振动模型的建立考虑了果树的主根吸收了一部分振动能量, 因此适宜的振动频率较大, 需考虑在该频率工作下青果的脱落及果实和树枝的损伤率。

采摘效率, 定义为单位时间采摘成熟果实的质量。青果脱落率, 定义为收获的果实中青果粒数所占果实总粒数的百分比, 其中半成熟果按青果处理。果实损伤率, 定义为收获的果实中剔除青果后, 破损果实粒数所占成熟果实粒数的百分比。树枝损伤率, 定义为机械采摘后, 被标记的损伤枝条数量占标记枝条总数的百分比。

3.2 试验过程

采摘试验在辽宁省丹东市五龙背蓝莓种植基地进行。选择蓝莓集中成熟期(成熟度在 85%以上)采摘。在蓝莓田间选择果实成熟程度相近的 16 段试验区并标号, 每段长 50 m, 其中 12 段由机械振动采摘, 分 3 组, 每组振动频率分别接近 18、24 和 30 rad/s, 余下 4 段由技术娴熟的工人进行手工采摘, 分别记录采摘时间和采摘量。

3.3 采摘效率与青果脱落率

以同期人工采果平均数为对照, 对比单台机械采摘与人工采摘量^[20-23], 分别记录每段作业区振动采摘和人工采摘的耗时、净采量, 并计算采摘效率。净采量为剔除叶片和树枝后的质量, 以果实净质量计算采摘量。

在每个区域收集到的果实中, 分别随机选取果实装满 1 个 400 mL 的容器, 计算果实总粒数、青果粒数, 用青果百分含量评价青果脱落率。只考虑振动采摘对青果脱落的影响, 不考虑采摘机车体结

构、行进速度等因素对青果脱落的影响。人工采摘效率为 0.66 kg/min。振动频率分别为 18、24、30 rad/s 时, 机械采摘效率分别为 3.47、7.17、7.93 kg/min; 青果脱落率分别为 3.6%、5.6%和 10.4%, 机械采摘的效率大约是人工采摘效率的 5~12 倍。当振动频率由 18 rad/s 增加至 24 rad/s 时, 采摘效率由 5 倍增加至 10 倍, 显著提高; 当振动频率由 24 rad/s 增加至 30 rad/s 时, 采摘效率由 10 倍增加至 12 倍, 变化不大。

机械采摘青果脱落率平均约为 4%~10%。当振动频率由 18 rad/s 增加至 24 rad/s 时, 青果脱落率变化不明显; 当振动频率由 24 rad/s 增加至 30 rad/s 时, 青果脱落率增加了 1 倍。由于在增加振动频率提高采摘效率的同时, 还要考虑青果的脱落, 结合采摘效率的分析, 24 rad/s 为比较适宜的振动频率, 青果脱落率为 5.6%。

3.4 适宜振动频率下采摘对果实及树枝损伤的影响

在振动采摘的果实中分别随机取 4 组等质量的果实, 得到振动采摘果实的损伤率平均约为 8.0%。采摘的过程中, 振动棒的撞击是果实破损的主要原因, 其次, 果实在采摘机行进中的撞击以及收集过程中的损坏等因素对果实破损也有影响。

在振动采摘的果树中随机取 4 组果树, 每组中随机选择完整健壮的枝条 20 枝并标记。采摘机通过后, 检查果枝的破坏程度。规定枝条损伤 1 处为轻度损伤, 损伤 2~3 处为中度损伤, 损伤 3 处以上为重度损伤。损伤总枝数占标记枝条总数的百分比为总体损伤率。

振动采摘轻度损伤率、中度损伤率和重度损伤率平均分别为 15%、10%和 5%, 总体损伤率约为 30%。总体损伤率较高, 在提高果实采摘效率的同时, 也导致了果树不同程度的损伤。损伤主要是轻度损伤, 重度损伤率较低。对比采摘效率, 总体损伤率可以接受。振动棒的撞击以及采摘机车体本身对果树的刮蹭是树枝损坏的影响因素。

参考文献:

- [1] Kader F, Rovel B. Fractionation and identification of the phenolic compounds of high bush blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.)[J]. Food Chemistry, 1996, 55(1): 35-40.
- [2] Strik B. Blueberry production and research trends in

- North America[J]. *Acta Horticulturae*, 2006, 715: 173-184.
- [3] Peterson D L, Wolford S D. Mechanical harvesting for fresh market quality stemless sweet cherries[J]. *Transactions of the ASAE*, 2001, 44(3): 481-485.
- [4] Peterson D L, Whiting M D, Wolford S D. Fresh-market quality tree fruit harvester[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2003, 19(5): 539-543.
- [5] 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.
- [6] 韩非. 蓝莓机器视觉识别与标定技术研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学机电工程学院, 2011.
- [7] 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.
- [8] 张晓文. 林木种子(球果)振动采集技术现状及展望[J]. *北京林业大学学报*, 1996, 18(1): 84-88.
- [9] 李志鹏. 蓝莓采摘机采摘策略及行走轨迹规划研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学交通学院, 2011.
- [10] 李元杰. 单摆的规则、随机及混沌运动的研究[J]. *大学物理*, 1998, 17(9): 7-9.
- [11] Pezzi F, Caprara C. Mechanical grape harvesting: Investigation of the transmission of vibrations[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 103(3): 281-286.
- [12] Peterson D L, Brown G K. Mechanical harvester for fresh market quality blueberries[J]. *Transactions of the ASAE*, 1996, 39(3): 823-827.
- [13] 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.
- [14] Horvath E, Sitkei G. Damping properties of plum trees shaken at their trunks[J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(1): 19-25.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Láng Z. A fruit tree stability model for static and dynamic loading[J]. *Biosystems Engineering*, 2003, 85(4): 461-466.
- [18] Láng Z. Dynamic modelling structure of a fruit tree for inertial shaker system design[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 93(1): 35-44.
- [19] Láng Z. A one degree of freedom damped fruit tree model[J]. *Transactions of the ASABE*, 2008, 51(3): 823-829.
- [20] 杨富营, 余泳昌, 高献坤, 等. 4YW-2型玉米收获机的性能改进与试验分析[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(12): 113-118.
- [21] 汤智辉, 孟祥金, 沈从举, 等. 机械振动式林果采收机的设计与试验研究[J]. *农机化研究*, 2010(8): 65-69.
- [22] 叶力勤, 李强, 陈渐宁, 等. 便携式枸杞采摘机采摘性能研究[J]. *宁夏农林科技*, 2009(4): 4-5.
- [23] 王业成, 陈海涛, 林青. 黑加仑采收装置参数的优化[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(3): 79-83.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 罗维