

基于有限元的山核桃树振动采摘研究

仇高贺^{1,2}

(1. 温州职业技术学院, 浙江温州 325000; 2. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江杭州 310018)

摘要 果实人工采摘成本较高,且对于生长在陡峭山地的山核桃果实采摘而言,存在一定的危险。因此研究果实振动采摘原理,实现果实的机械采摘有重要意义。分步建立果树柔性梁、树根与地面连接的数学模型,在理论上分别建立果树、树根、激励力锤的柔性模型,并在有限元软件中进行果树振动采摘和采摘机构相关的动力学分析。该方法与现场果树振动采摘激励数值比较接近,可以作为研究和设计果树振动装置的一种方法。

关键词 果品;收获;振动;有限元

中图分类号 S225.93 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)05-312-04

Study on Hickory Vibration Picking Based on FEA

QIU Gao-he^{1,2} (1. Wenzhou Vocational & Technical College, Wenzhou, Zhejiang 325000; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018)

Abstract Artificial fruit picking cost is higher, and there is a certain risk for the walnut fruit picking which grow in steep mountain. Therefore, studying fruit vibration picking mechanism and realizing fruits mechanical harvesting are of great significance. The mathematical model of flexible beam, roots and ground connection was established step by step, on the theoretical basis, flexible models of fruit trees, roots and incentive hammer was built respectively. Dynamics analysis was conducted on vibration picking and related mechanism in FEA software. The result showed the flexible vibrate mode tree is close to the value of experiment, which can be utilized for researching and designing fruit tree vibration device.

Key words Fruit; Harvesting; Vibration; FEA

目前国内果园收获主要依靠人工采摘,其费用占果实生产成本的50%左右^[1]。随着国内劳动力成本不断上涨,我国林业必须向规模化、产业化方向发展,而果实人工采收的方式已不能满足产业发展的需要,因而对果品收获机械的需求越来越迫切,其中振动采摘方法收获效率高,可比人工采摘提高5~10倍,能实现大规模采收,极具推广应用价值。国内山核桃分布在浙皖一带,在陡峭的山地上生长,所以山核桃采摘难度很大,每年临安地区都有因采摘山核桃而发生伤亡的事故,果实机械采摘替代人工采摘更具有维护社会和谐发展的巨大社会意义。为实现振动采摘的机械化,笔者深入研究果树采摘振动机理,以便进行果实采摘仿真进而提高振动采摘装置的效率。

1 果树振动数学模型

1.1 树干与果实振动数学模型 振动采摘果实的工作原理是通过一定形式的振动机构,将机械振动传递给果树,果树在外力的强迫振动下也以一定的频率和振幅振动,从而使果枝上的果实产生振动,由于果实受自身惯性力作用,如果果柄连接处的剪应力小于受迫振动产生的作用力,果实就会脱离果柄连接实现振动采摘。在果树运动过程中,如果将主干与地面连接作用简化,将果树主干和地面连接系统简化为悬臂梁,根据虚功原理有^[3-4]:

$$\delta d^T (M_e \ddot{d} + K_e d - F_e) = 0 \quad (1)$$

式中, M_e 是柔性梁单元的质量阵; K_e 是柔性梁单元的刚度阵; F_e 是柔性梁单元的节点力; \ddot{d} 和 d 是柔性梁单元节点的加速度和位移。由于 δd^T 任变性,可以得到柔性梁任一单元

运动微分方程:

$$M_e \ddot{d} + K_e d = F_e \quad (2)$$

考虑果树系统在外力作用下做受迫运动时存在阻尼因素,对于复杂果树系统,通常将各种类型的阻尼都化作等效黏性阻尼,简化后的“果树·机械”系统的阻尼可表示为:

$$D = \frac{1}{2} c \dot{d}^2 \quad (3)$$

式中, D 为瑞利耗散函数, c 为系统等效黏性阻尼系数($N \cdot s/m$)。为了分析系统的动力学特性,引入拉格朗日第二类动力学方程(拉氏方程):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (4)$$

式中, L 为拉格朗日量; Q 为系统广义外力(N); q 为广义坐标; \dot{q} 为 q 的一阶倒数。将式(1)~(3)代入拉氏方程(4),导出系统有阻尼动力学方程为:

$$M \ddot{d} + c \dot{d} + K d = Q \quad (5)$$

1.2 树根与地面连接计算模型 土体部分按非线性弹性体计算,采用邓肯-张(Duncan-Chang)双曲线模型,且服从莫尔-库伦(Mohr-Coulumb)破坏准则^[5-8],相应的计算公式如下:

(1)切线模量:

$$E_t = 1 - R_f \frac{(1 - \sin U)(R_1 - R_3)^2}{2c \cos U + 2R_3 \sin U} \cdot K_p \frac{R_3}{P_a} \quad (6)$$

式中, R_1 、 R_3 为大小主应力; K 为弹性模量; R_f 为破坏比; c 和 U 为土地黏聚力及摩擦角; p_a 为大气压力。

(2)切线泊松比:

$$L_i = \frac{L_i}{(1 - A)^2} \quad (7)$$

式中, L_i 为初始切线泊松比。

$$L_i = G - \Psi g_p^{R_p} \quad (8)$$

基金项目 国家自然科学基金资助项目(11272287,51175476);浙江省教育厅资助项目(JB076)。

作者简介 仇高贺(1976-),男,江苏丰县人,高级工程师,在读博士,从事果实振动采摘研究。

收稿日期 2016-01-20

$$A = \frac{(R_1 - R_3)\Omega}{E_i(1 - R_j S)} \quad (9)$$

(8)和(9)式中, Ω 、 G 、 Ψ 为实验参数,通过三轴实验确定; E_i 为初始切线模量; S 为应力水平。

2 果树柔性模型及振动仿真

2.1 果树地面以上部分模型的建立

山核桃树属于落叶乔木,为采集树木主干和侧枝部分的三维数据,需要等待树叶枯萎后进行图像采集,此时树干呈灰色,采取基于动态跟踪技术同时获得枝干的2条轮廓,提取枝干区域的方法,即利用扫描线的动态跟踪技术获取枝干的轮廓,通过现场测绘获得果树主干和侧枝的直径尺寸,通过三维建模软件建立果树部分的数字化三维模型^[9],并导入 ANSYS 进行离散化,采用实体单元 solid 186 来模拟果树主干和侧枝部分。solid 186 是3维20节点实体,具有二次位移,适用于模拟不规则网格,由20个节点定义,每个节点3个自由度,具有空间的任何方向,具有塑性、超弹性、应力强化、大变形、大应变能力,

可用来模拟几乎不能压缩的次弹性材料和完全不能压缩的超弹性材料的变形。取山核桃树枝干进行试验测试,试验数据均值为:树干密度为 927.65 kg/m³,树干含水率 26.99%,径向弹性模量为 6 515.00 MPa,横向弹性模量为 8 055.50 MPa,阻尼比为 0.43。将离散化的果树模型通过 ANSYS 与 Adams 专用接口生成 MNF 文件导入 Adams 中,由于柔性体不能直接和其他刚体或柔性体建立约束关系,需要建立亚物体(质量和惯性矩为零的 Dummy 体),并将柔性果树与亚物体固定,从而完成果树地面以上部分建模^[10-11]。果树柔性体建模流程如图 1 所示。通过有限元方法可以求出山核桃树各阶模态,如图 2 所示。通过力锤激励方法可以得出山核桃树模态,将两者结果进行比较,如表 1 所示。从对比数据来看,两者得到的固有频率大小很接近,振动的形态也很相似,差别在于振动时枝干的运动方向,由于树木参数是落叶后采集测试,树木枝干水分含量有所变化,导致弹性模量有所增加是存在差异的原因^[12]。

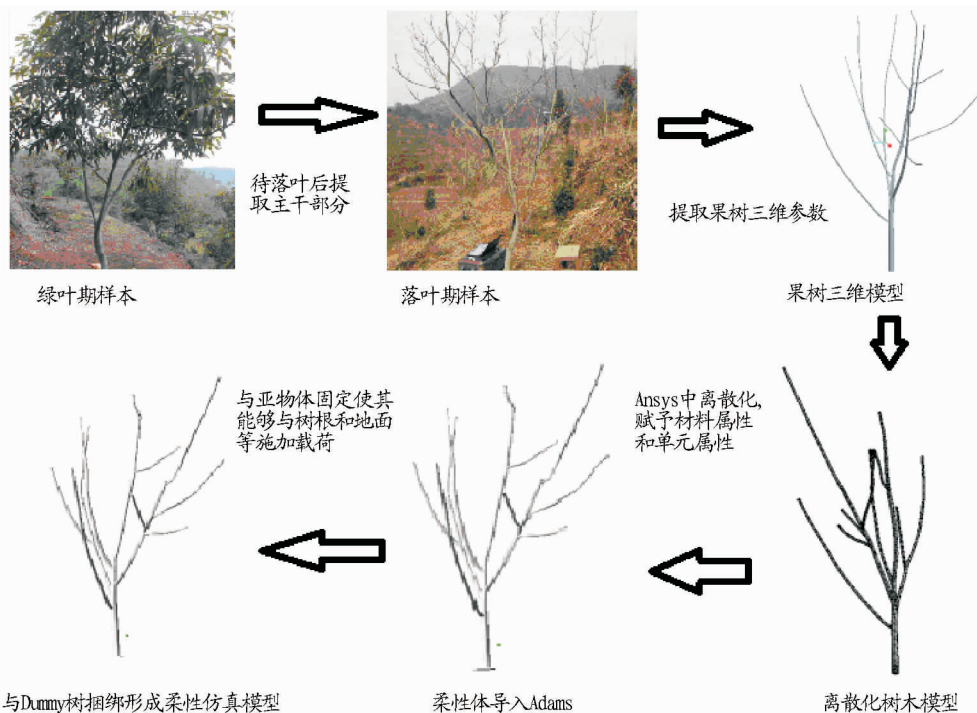


图1 果树柔性体部分建立流程

Fig.1 The establishment process of flexible part of fruit tree

2.2 果树根部模型的建立

果树地面以下部分可看作是由土体、根系以及土体与根系之间的接触单元所联系起来的有机体。按照根的形态特征将根型分为3类^[13]:垂直根型、散生根型(或斜生根型或心状根型)和水平根系,该研究采用垂直根型,其形态模型见图3。垂直根型的垂直根和侧根均按等径处理,主根垂直于地表,其他3条侧根平行于地表,且两两呈120°均匀分布在主根360°范围内。垂直根型的垂直根和3个侧根在Adams中可以使用Bushing连接来模拟,根据山核桃树土壤三轴压缩实验、山核桃树根系与土壤接触面直剪摩擦实验以及山核桃树根的拉伸实验,得到土体计算参数、接触面计算参数、根系计算参数:三轴压缩实验测得土壤的含水率为23.5%,土壤的干密度为1.36 g/cm³,摩擦系

数为0.6,容重为1.3 g/cm³,黏聚力35 kPa,泊松比0.3,土壤的变形弹性模量39 MPa,内摩擦角23.5°,破坏比为0.12,塑性指数为14,承载力0.55 MPa。考虑到岩土材料通常是非线性的,存在塑性变形,具有与时间有关的变形特性流变性以及各向异性、非均质、不连续等特性。可选择solid 95或类似高级实体单元,该类单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力刚化、大变形、大应变等功能。

2.3 果树受迫振动分析

采用力锤对树干进行激励从而使枝干产生振动,果树枝干进行受迫振动,力锤锤击方向尽量垂直树干部分,认为枝干只产生径向振动,力锤振动锤击点的频率响应点通过固定在测试点的三轴加速度传感器测量并通过采集与分析系统(型号:AVANTMI-7008)获得测试点

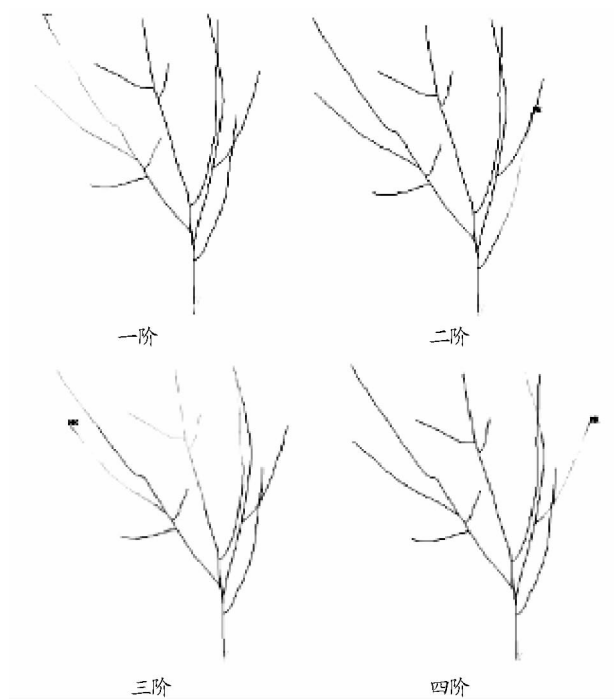


图2 Ansys 计算果树前四阶模态

Fig.2 The first four modes of fruit trees calculated with Ansys

表1 2种方法得出的果树前四阶模态

Table 1 The first four modes of fruit trees calculated by two methods

四阶模态 Four modes	树干固有频率 Natural frequency of trunk	
	实验均值 Test mean	ANSYS
1阶 1 order	2.38	3.20
2阶 2 order	4.25	3.23
3阶 3 order	4.88	3.97
4阶 4 order	6.88	5.04

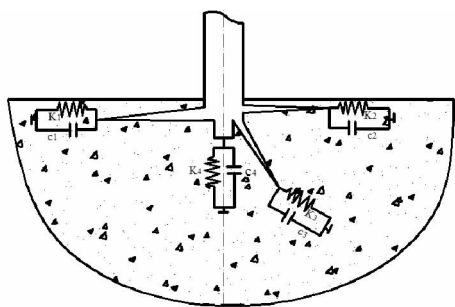


图3 根系连接模型

Fig.3 Roots connection model

的试验参数^[14]。尼龙、橡胶锤头需采用柔性体仿真,建模方法同树体部分相同,将树体、根系、力锤柔性单元导入 Adams 中,整个树木振动采摘系统在 Adams 动力学模型如图 4 所示,力锤的锤击力取实验测的平均值,力锤使用单向力 (Force)在模拟。在力锤激励点上建立输入通道,选取力锤作用方式为沿单一方向“Swept Sine”模式,大小为 20 N,在频率响应点建立振动输出通道,建立位移输出,并在后处理程序得到激励点的频率响应数值。将树木砍断后在实验室当作刚性悬臂梁进行仿真的树干频响如图 5(A)所示,山核桃

树种植地现场测试树干振动频响如图 5(B)所示,Adams 中使用柔性体仿真的激励点频率响应如图 5(C)所示。从图 5 中可以看出,把树木当作柔性体并考虑根系的锚固作用进行仿真比当成刚性悬臂梁进行仿真更加接近实际树木振动工况。

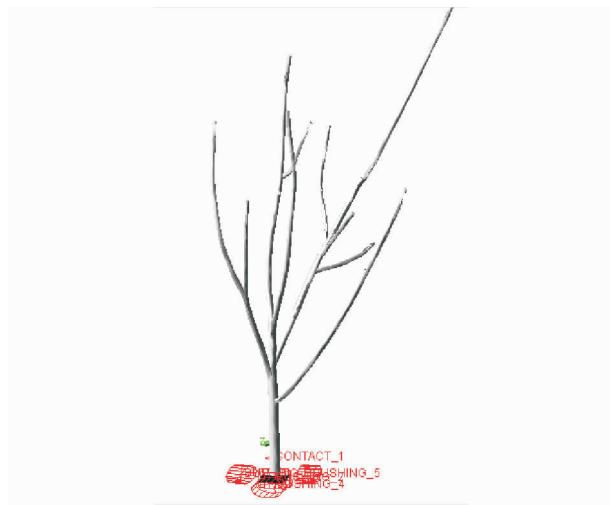


图4 山核桃树激振系统模型

Fig.4 Excitation system model of hickory tree

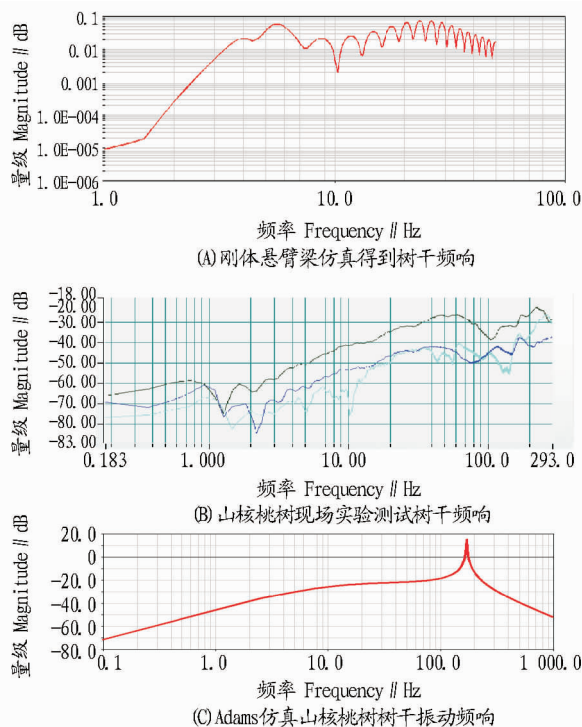
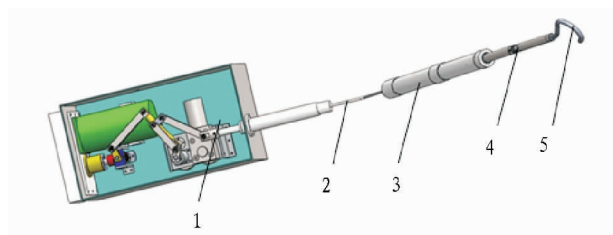


图5 3种方法测得树干频率响应对比

Fig.5 Comparison of truck frequency response measured by three methods

2.4 山核桃振动采摘机构设计应用 基于山核桃树的振动原理分析,采用变频变幅振动式采摘装置进行振动采摘,其机构原理图如图 6 所示。

该装置通过调整调幅曲柄长度实现振幅调整,通过改变调速电机的转速来调整山核桃树枝的振动频率。通过 Adams 中参数化建模,将曲柄和连杆长度设定为参数化设计变



注:1. 变频变幅箱;2. 钢丝绳;3. 手持柄;4. 伸缩杆;5. 夹持机构。

Note:1. The frequency and amplitude conversion box; 2. Wire rope; 3.

Handle; 4. Retractable spear; 5. Clamping device.

图 6 山核桃采摘装置结构

Fig. 6 The structure of hickory vibration picking device

量,经过 Adams 仿真可以得出曲柄旋转角度为 164° 和 322° , 取到了最大行程和最小行程,分别为 4.00 cm 和 2.23 cm,则调幅范围为 1.77 cm,采摘机构动力矩变化如图 7 所示。在 Adams 中基于柔性体的山核桃振动采摘机构进行动力学仿真,显示该机构可以输出组合频率周期激励。通过现场振动采摘机构扭力测试,与仿真结果误差小于 20%。基于树根锚固作用 Adams 动力学模型可以验证振动夹持位置过低,果树振动幅值小,不利于采摘,但如果振动夹持位置过高,树枝失去根部支持,加上上部树枝较细,振幅也很小。山核桃采摘现场如图 8 所示。

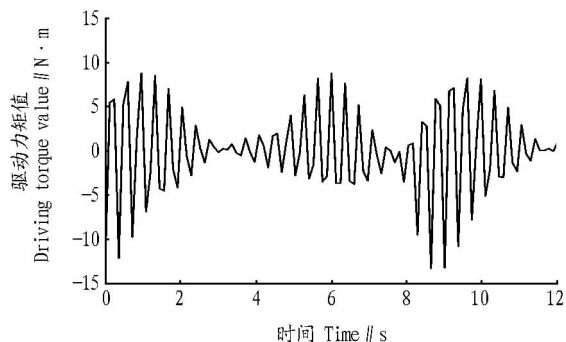


图 7 山核桃采摘机构动力矩变化曲线

Fig. 7 The change curve of driving torque value of hickory vibration machine

3 结论

研究可知,通过建立果树及根部柔性体与岩土相关作用,能够较准确模拟出树木根部的锚固作用,比单纯采用悬臂梁获取树木频响更接近现场测试工况。

有限元方法测得树木模态与实际测试值很接近,说明山核桃树枝干和地面系统可以简化为黏性、弹性系统,进行模态分析的结果和实测值比较接近。

通过有限元离散后的柔性模型导入动力学进行柔性化后的动力学分析方法可以用来设计采摘机构,提高果实采摘

装置设计效率。



图 8 山核桃振动采摘现场

Fig. 8 The scene of hickory vibration picking

参考文献

- [1] 陈度,杜小强,王书茂,等. 振动式果品收获机理分析及研究进展[J]. 农业工程学报,2011,27(8):185-201.
- [2] 汤智辉,孟祥金,沈从举,等. 机械振动式林果采摘机的设计与试验研究[J]. 农机化研究,2010(8):65-69.
- [3] 沈瑞珍,张晓文. 银杏侧枝振动落果的试验研究[J]. 林业科学,1997,33(2):81-87.
- [4] 丁正辉,朱德泉,钱良存,等. 山核桃坚果有限元模型建立及受力分析[J]. 农业装备与车辆工程,2010,6(6):6-9.
- [5] 陶嗣巍,赵东. 根土相互作用关系对树干振动特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2013,37(6):77-81.
- [6] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍. 林木根系固土作用数值分析[J]. 北京林业大学学报,2006,28(12):80-84.
- [7] 刘凤芹,吴伟,刘秀萍,等. 林木根系结构动态模型研究[J]. 水土保持研究,2006,13(3):265-269.
- [8] 程洪,谢涛,唐春. 植物根系力学与固土作用机理研究综述[J]. 水土保持通报,2006,26(1):97-103.
- [9] 张敏敏,王春耀,王学农,等. 果树力学性能的试验研究[J]. 江苏农业科学,2015,43(4):381-383.
- [10] 张爱莲,陈书剑. ADAMS 柔性体建模技术研究[J]. 煤矿机械,2011,32(6):95-97.
- [11] 蒲明辉,吴江. 基于 ADAMS 的甘蔗柔性体模型建模研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(7):1930-1932.
- [12] 李志鹏,赵德金,郭艳玲. 基于 Matlab 蓝莓树枝径向受迫振动仿真研究[J]. 森林工程,2014,30(1):84-90.
- [13] 翁凌云,许林云. Y 型果树动力学模型假设与分析[J]. 农机化研究,2013(4):19-25.
- [14] 段虎明,秦树人,李宁. 频率响应函数估计方法综述[J]. 振动与冲击,2008,27(5):48-52.