

分类号: S23
学号: 20222109037

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



红枣收获机分层激振装置设计与试验

学位申请人	徐向东
指导教师	坎杂 教授 戚江涛 高级实验师 陈绍杰 工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	农机装备工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

分类号: S23
学号: 20222109037

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



红枣收获机分层激振装置设计与试验

学位申请人	徐向东
指导教师	坎杂 教授 戚江涛 高级实验师 陈绍杰 工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	农机装备工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

**Design and experiment of layered excitation device for jujube
harvester**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Xu Xiang-dong

(Agricultural machinery equipment engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Kan Za

May,2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：徐向东

时间： 2025 年 5 月 26 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：徐向东

时间： 2025 年 5 月 26 日

导师签名：坎杂

时间： 2025 年 5 月 26 日

摘要

红枣是我国种植面积最广的果树之一，是有很高经济价值和营养价值的特色林果。近年来，红枣种植已逐渐规模化，人工采收方式已不能适应新疆红枣产业的发展，迫切要实现机械采收作业。然而，现有红枣振动采收机容易产生因振动能量过大而伤果伤树，或振动能量过小而影响采收率的问题。究其原因是红枣机械采收过程中的振动传递机理不明确，振动输入加速度与果柄分离加速度不匹配。因此，本文开展分层激振采收方式研究，探究矮化密植骏枣振动采收时的加速度传递响应特性，寻求较优的工作参数组合，为红枣振动采收机械设计提供参考。主要研究内容与结论如下：

(1) 通过测量与试验，获取了不同分级枣枝几何结构参数及材料特性变化规律。发现主干、一级枝 A1、二级枝 B1 的平均长度逐渐增大，主干平均长度较小为 402.57 mm；二级枝 B1 平均长度最大为 659.3 mm。枣树主干及一级枝长度有所控制，而新生二级、三级枝条较长，且沿生长高度方向逐渐变短。枣树一级枝密度最小，其他枝密度接近；枣树一级枝弹性模量最小，其他枣枝弹性模量范围在 4956.31~6830.28 MPa。建立了枣枝—果柄—果实单摆动力学模型，获取了果实振动的微分方程，分析了果实脱落条件，确定了影响振动采收效果的主要因素。

(2) 结合果树生长结构特征，确定了分层激振装置整体方案、作业条件及工作参数，完成了关键部件设计和选型。将样本枝简化为质量—弹簧—阻尼模型，并结合枣枝、枣果物料特性测试结果，获取了等效模型参数；通过分析确定了激振力，利用四阶龙格-库塔算法求解了不同等效质量块受激振力下的位移和速度变化曲线，结果表明分层激振可增大测点加速度。基于三维扫描和逆向重构的方法生成了样本枝有限元模型，利用 Ansys 软件的模态、谐响应分析功能获取了枣枝自身振动特性。仿真表明 0~30 Hz 内枣枝存在多阶固有频率，典型的振型包括：枣枝的整体变形、单侧分枝的变形、枣枝末端细枝的变形。通过谐响应分析获取了不同枣枝上不同测点对 0~30 Hz 内频率的敏感程度，发现不同分支上测点出现的共振频率区间是接近的，但每条路径上出现最大峰值的频率不同，这与分枝的路径相关。

(3) 搭建分层激振试验台对枣树植株进行了扫频试验，确定了不同测点出现频数较高的频率 4、6、11、15、20 Hz，与仿真结果相近，分析实验结果可知同一枣枝上不同测点的频率响应曲线一致性较好，变化趋势相近。结合样本树生长结构、仿真及试验结果对枣树进行了分层，确定了分层依据；探究了单输入激振、分层激振及不同工作参数（激振位置、激振频率、激振振幅）下枣枝间的加速度传递规律，通过力传感器对不同参数下激振力的大小进行了测定，进一步分析了激振参数对枣树振动特性的影响。

(4) 以不同分层激振参数为试验因素，以三级枝上测点综合评分为评价指标进行了多因素交互试验，获取了对综合评分影响显著的单因素和交互因素指标。对综合评分的二次回归模型进行优化求解，获取了分层激振下的较优工作参数组合：下层激振频率 5.80 Hz、下层激振振幅 7.00 mm、上

层激振频率 15.60 Hz、上层激振振幅 8.50 mm，此时三级枝上测点的加速度与分离加速度最接近，在此参数组合下的平均采净率为 88.74%。

关键词：红枣；分层激振采收；三维扫描与逆向重构；有限元仿真；加速度传递

Abstract

Jujube is one of the most widely planted fruit trees in China. It is a characteristic fruit with high economic value and nutritional value. In recent years, jujube planting has been gradually scaled up, and the manual harvesting method can no longer adapt to the development of Xinjiang jujube industry, so it is urgent to realize mechanical harvesting. However, the existing jujube vibration harvesters are prone to damage trees due to excessive vibration energy, or affect the recovery rate due to too small vibration energy. The reason is that the vibration transmission mechanism in the mechanical harvesting process of jujube is not clear, and the vibration input acceleration does not match the fruit stem separation acceleration. Therefore, this thesis studies the layered vibration harvesting method, explores the acceleration transmission response characteristics of dwarf close planting Jun jujube during vibration harvesting, and seeks a better combination of working parameters to provide reference for the design of jujube vibration harvesting machinery. The main research contents and conclusions are as follows:

(1) Through measurement and experiment, the geometric structure parameters and material properties of different grading jujube branches were obtained. It was found that the average length of trunk, primary branch A1 and secondary branch B1 increased gradually, and the average length of trunk was 402.57 mm. The maximum average length of secondary branch B1 was 659.3 mm. The length of jujube trunk and primary branch was controlled, while the new secondary and tertiary branches were longer, and gradually shortened along the growth height direction. The density of the first branch of jujube tree was the smallest, and the density of other branches was close. The elastic modulus of the first branch of the jujube tree was the smallest, and the elastic modulus of the other branches ranged from 4956.31 to 6830.28 MPa. The dynamic model of jujube branch-petiole-fruit simple pendulum was established, the differential equation of fruit vibration was obtained, the condition of fruit abscission was analyzed, and the main factors affecting the effect of vibration harvesting were determined.

(2) Combined with the structural characteristics of fruit tree growth, the overall scheme, operating conditions and working parameters of the layered excitation device were determined, and the design and selection of key components were completed. The sample branch was simplified as a mass-spring-damping model, and the equivalent model parameters were obtained by combining the test results of jujube branch and jujube fruit material characteristics. The excitation force is determined by analysis, and the displacement and velocity curves of different equivalent mass blocks under excitation force are solved by the fourth-order Runge-Kutta algorithm. The results show that the layered excitation can increase the acceleration of the measuring point. Based on the three-dimensional scanning and reverse reconstruction method, the finite element model of the sample branch was generated. The modal and harmonic response analysis functions of Ansys software were used to obtain the vibration characteristics of the jujube branch itself. The simulation results show that there are multi-order natural frequencies of jujube branches within

0~30 Hz. The typical vibration modes include the overall deformation of jujube branches, the deformation of unilateral branches, and the deformation of fine branches at the end of jujube branches. Through the harmonic response analysis, the sensitivity of different measuring points on different jujube branches to the frequency of 0~30 Hz was obtained. It was found that the resonance frequency interval of measuring points on different branches was close, but the frequency of the maximum peak on each path was different, which was related to the path of branches.

(3) A layered excitation test bench was built to conduct a frequency sweep test on jujube plants. The frequencies of 4,6,11,15, and 20 Hz with high frequencies at different measuring points were determined, which were similar to the simulation results. The experimental results showed that the frequency response curves of different measuring points on the same jujube branch were in good agreement and the trends were similar. Based on the growth structure, simulation and test results of the sample tree, the jujube tree was stratified and the stratification basis was determined. The energy transfer law between jujube branches under single input excitation, layered excitation and different working parameters (excitation position, excitation frequency, excitation amplitude) was explored. The excitation force under different parameters was measured by force sensor, and the influence of excitation parameters on the vibration characteristics of jujube trees was further analyzed.

(4) The multi-factor interaction test was carried out with different layered excitation parameters as the test factors and the comprehensive score of the measuring points on the third branch as the evaluation index, and the single factor and interactive factor indexes which had significant influence on the comprehensive score were obtained. The quadratic regression model of the comprehensive score is optimized and solved, and the optimal working parameter combination under layered excitation is obtained: the lower excitation frequency is 5.80 Hz, the lower excitation amplitude is 7.00 mm, the upper excitation frequency is 15.60 Hz, and the upper excitation amplitude is 8.50 mm. At this time, the acceleration of the measuring point on the tertiary branch is the closest to the separation acceleration, and the average recovery rate under this parameter combination is 88.74 %.

Key words: Jujube; Layered excitation harvesting; Three-dimensional scanning and reverse reconstruction; Finite element simulation; Acceleration transmission

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第1章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 林果振动采收装置.....	2
1.2.2 果树建模分析.....	4
1.2.3 果树枝干振动力学行为.....	6
1.3 研究目标与内容.....	8
1.3.1 研究目标.....	8
1.3.2 研究内容.....	8
1.4 研究方法与技术路线.....	9
1.4.1 研究方法.....	9
1.4.2 技术路线.....	10
第2章 枣枝物料特性测定与振动采收影响因素分析.....	12
2.1 研究对象确定.....	12
2.1.1 种植模式调研及测量.....	12
2.1.2 样本枝结构确定.....	13
2.2 枣枝物理特性测试.....	15
2.2.1 几何结构参数测试.....	15
2.2.2 密度测试.....	16
2.3 枣枝力学特性测试.....	17
2.3.1 抗弯弹性模量测试.....	17
2.3.2 阻尼比测试.....	19
2.4 振动采收影响因素分析.....	20
2.4.1 枣枝-果柄-果实的单摆模型.....	20
2.4.2 果实脱落影响因素分析.....	23
2.5 本章小结.....	24
第3章 分层激振装置整体方案确定与枣枝振动力学分析.....	25
3.1 分层激振装置总体方案确定与工作原理分析.....	25
3.2 分层激振装置设计.....	26

3.2.1	分层激振装置作业条件确定	26
3.2.2	分层激振装置工作参数分析与确定	27
3.2.3	分层激振装置设计与选型	30
3.3	枣枝质量—弹簧—阻尼等效模型	31
3.3.1	枣枝质量—弹簧—阻尼简化模型建立	31
3.3.2	激振力的确定	32
3.3.3	等效参数的确定	33
3.3.4	枣枝等效模型求解与分析	34
3.4	枣枝有限元模型建立与仿真	39
3.4.1	枣枝有限元模型的建立	39
3.4.2	模态分析	40
3.4.3	频率响应分析	42
3.5	本章小结	44
第4章	分层激振装置工作参数对枣枝振动传递特性的影响	45
4.1	分层激振试验台	45
4.2	各级枝固有频率测试	47
4.2.1	扫频测试	47
4.2.2	数据处理与结果分析	47
4.2.3	枣枝分层及分层激振依据	50
4.3	单输入枣枝激振试验	50
4.3.1	激振位置对测点加速度的影响	51
4.3.2	激振频率对测点加速度的影响	53
4.3.3	激振振幅对测点加速度的影响	54
4.4	分层输入枣枝激振试验	54
4.4.1	激振位置对测点加速度的影响	55
4.4.2	激振频率对测点加速度的影响	56
4.4.3	激振振幅对测点加速度的影响	57
4.5	单输入与分层输入下测点加速度的对比	58
4.6	激振装置工作参数对激振力的影响	59
4.7	本章小结	62
第5章	分层激振装置试验与优化	63
5.1	分层激振装置多因素试验	63
5.1.1	试验目的与试验因素	63
5.1.2	评价指标与测量方法	63

5.1.3 试验结果与分析.....	64
5.1.4 响应曲面分析.....	67
5.1.5 参数组合优化.....	68
5.2 分层激振装置田间试验验证.....	68
5.3 本章小结.....	69
第 6 章 结论与展望.....	70
6.1 结论.....	70
6.2 展望.....	71
参考文献.....	72
致谢.....	78
作者简介.....	79

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

红枣是我国种植面积最广的果树之一，已有四千多年的种植历史，有很高的营养价值和经济价值^[1,2]。全国红枣种类有800多种，种植面积和产量占全世界的99%^[3]。因新疆地区昼夜温差大，光照时间长，独特的地理位置和气候条件都非常适宜红枣生长，据统计，2019-2023年新疆红枣产量连续五年占比全国近50%^[4]。

近年来红枣种植已逐渐标准化、规模化，但新疆红枣收获仍以人工作业为主^[5,6]。在采收期枣农用棍、棒等工具敲击枣树，将红枣振落，再进行捡拾、筛选和运输作业，如图1-1(a)所示，存在劳动强度大、成本高、效率低等诸多问题^[7]。

因此有学者提出了机械振动采收红枣的方法，如图1-1(b)所示，红枣收获机械在作业过程中，将设备产生的机械能转化为果树的振动能量，其工作效率主要取决于果实采收的效果。影响采收效果的因素主要包括两点：一是果树自身的生物特性，二是振动采收设备的工作参数。在果树特性方面，可通过育种改良、抚育管理和整形修剪等技术手段，优化其结构以适应机械化采收需求。而在设备参数方面，振动位置、频率、振幅及激振时间是核心调控指标，这也是林果振动收获机械研制时考虑的主要因素^[8]。



(a) 人工采收红枣



(b) 机械采收红枣

图 1-1 红枣采收

Fig.1-1 Jujube harvest

振动采收过程中激振装置的作用位置可以选择主干也可以选择其他细枝，主干振动往往需要更大的振动能量，从而使能量充分传递到枣树的各级分枝。能量过大时会引起枣树损伤，甚至导致树根松动，难以越过冬季。因此，通常对枣树上侧较细的枝条进行激励，振动能量在各级分枝间传递，激振力迫使枣枝弯曲变形并将运动传递给红枣，当红枣获得的加速度大于分离加速度时，实现采收。然而，现有红枣收获机容易产生因振动能量过大而伤果伤树，或振动能量过小而影响采收率的问题，究其原因是红枣机械采收过程中的振动加速度传递机理不明确，振动输入加速度与果柄分离加速度不匹配。

因此本文对枣树各级枝条的材料特性进行测试,分析各级枣枝材料特性差异。建立枣枝振动模型,确定采收效果影响因素;在此基础上,开展枣枝分层激振试验,探究不同工作参数下枣枝的加速度传递特性,优化振动输入加速度与果柄分离加速度间的匹配关系,寻求适宜红枣机械振动采收的激振形式,为研发高效低损红枣采收装置提供支撑。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 林果振动采收装置

机械振动式林果采收技术是国内外最通用的一种收获技术,也被认为是目前最容易实现且收获效果最明显的机械收获方式^[8],它能够有效将果实从果树分离,提高收获效率、降低收获作业成本,因此近年来国内外学者对核桃、橄榄、冬枣等林果振动采收技术进行了大量研究^[9-12]。

1965年 Adrian 等^[13]提出了惯性式摇树器的基本振动理论和设计准则,认为通过摇动树枝和树干来收获是最有希望的。1991年 Parameswarakumar 等^[14]设计了一种用于收获芒果的惯性式滑臂曲柄振动机,发现在振幅 76~102 mm 和 11~13 Hz 的频率下工作 4 s,可以获得最大的果实去除率和最小的树木损伤。Sansavini 等^[15]使用博洛尼亚大学的机械收获机原型进行了机械收获试验,试验表明机械收获有工作速度快、节省人力的优点。

Ruijun Ma 等^[16]利用摇干机研究了 4 种不同振动方式对不同树龄、形状和大小的开心果树 3 种大小的影响。发现使用惯性式树干振动筛采收较大的开心果树需要更多的能量。对于较大的开心果树来说,施加在树干上的大部分力可以传递至一、二级枝,而三级枝上的振动能量较少。因增加力或能量可能会对树木造成结构破坏或损害树木的根系,所以振动收获时能输入的力和能量是有限制的。

Kececioglu 等^[17]开发了一种用于橄榄收获的惯性式振动筛,发现以在 20~28 Hz 的频率和 20~30 mm 的振幅摇动橄榄树 10 s 时采收效果最好。Refik Polat 等^[18]用液压驱动的惯性式振动筛对开心果进行机械采收,发现振幅为 50 mm,频率为 20 Hz 时,果实采收率为 95.5%。S. Castro García 等^[19]对干式振动筛进行了分析,工作时在一台振动筛中检测到共振情况,因此激振器产生的加速度值更高,共振现象对树体造成的损害也增加了。

Caprara 等^[20]设计了一种挠性肋条式葡萄振动采收机械,如图 1-2 所示,偏心摇杆机构驱动挠性肋条振动对葡萄枝干进行旋转打击,实现振动采收。Coral Ortiz 等^[21]设计了一种轻型实验摇床用于观赏柑橘采摘,发现当机械进入主要分支困难时,采收效果会降低 40%。Savary 等^[22]针对收获期柑橘采收问题研发了一种树冠振动式柑橘收获机,利用分布于柑橘树两侧的单滚筒振动装置进行作业。



图 1-2 葡萄收获机
Fig.1-2 Grape harvester



图 1-3 高酸苹果振动式采摘机
Fig.1-3 High acid apple vibrating picking machine

Hongjun Ni 等^[23]研制了由振动机构、收集机构和分选机构组成的采收装置，发现枣树的振动位移与树干直径和振动位置有关。Delin Wu 等^[24]用油茶果冠层振动收割机研究了振动位置对采收效果的影响，发现随着油茶树生长年限的增加，最佳激励位置也在上升。尚书旗等^[25,26]设计了一种高酸苹果振动式采摘机，如图 1-3 所示，发现振动频率为 10.0 Hz、振幅为 1.6 cm、夹持高度为 58.7 cm 时采收效果较好。

付威等^[27]设计了一种自走式矮化密植红枣收获机，该机可骑跨在枣树上行走，作业时扶枝器将枣枝喂入激振装置，通过拨杆产生振动实现红枣采收，丁凯^[28]则通过理论分析和 Adams 仿真对自走式矮化密植红枣收获机的激振装置进行了优化。梅松等^[29]研发了一种仿形拍振式复合小型红枣采收机，该机作业时采净率可达 90%。

陈嘉瑶等^[30]设计了轴向振动式蓝莓采摘机，其振动采摘子系统中增加了弹簧系统，且振动指棒在装置工作过程中能被动旋转，可以有效降低对蓝莓植株的伤害。耿雷等^[31]设计了适合高丛蓝莓采收作业的牵引式蓝莓采收机，如图 1-4 所示，郭艳玲等^[32]研制了手推式矮丛蓝莓采摘机，如图 1-5 所示。



图 1-4 高丛蓝莓收获机
Fig.1-4 Highbush blueberry harvester



图 1-5 矮丛蓝莓采摘机
Fig.1-5 Lowbush blueberry picking machine

丁红星^[33]设计了一款用于桑葚的便携式振动采摘装置，可实现二级主干振动采收。李斌^[34]设计了一种树冠振动式荔枝采摘装置，工作时振动棒插入树冠，汽油机输出动力控制偏心轮旋转从而控制振动梳排做往复摆动运动，实现振动采摘。

综上所述，国内外学者对林果振动采收技术及装备进行了大量研究，并通过试验等

方式获得了不同林果的较优工作参数组合；但不论是主干式、树冠式还是便携式振动采收装置，其振动参数输入（频率、振幅）都是单一的，因此本文开展分层激振采收方式研究，对枣枝不同分层分别设置激振参数进行试验。

1.2.2 果树建模分析

果树的生长环境一般较为复杂，田间试验研究具有一定的难度，因此很多学者通过对果树建模以简化研究过程，比如建立果树的质量—弹簧—阻尼模型、梁件模型等。用测量到的果树几何结构参数和材料特性参数建立有限元模型也是常见的方法，通过有限元仿真分析树体振动响应特性，以便更有效地设计和优化收获装置。

Whitney 等^[35]将果树视为一个具有阻尼、刚度和质量振动系统，振动时由刚度为其提供持续振动能力，由阻尼对振动能量产生消耗。Upadhyaya 等^[36]基于线弹性梁振动理论建立了果树树枝的动力学模型，并考虑了果枝弹性模量、质量和阻尼对振动特性的影响。Ray 等^[37]通过建立具有刚度、阻尼特性的树木枝干弯曲振动模型，分析了不同部位的振动力学行为差异。

Horvath 等^[38]将果树简化为包含主根和土壤的等效质量模型，发现激振位置越高，根系—土壤部分在整个系统中所占有效质量比重越小。Z. Láng 等^[39]将樱桃树等效为一种二自由度模型，如图 1-6 所示。该模型一方面代表了具有一定土壤的根系和树干，另一方面代表了主要的枝干，模型的计算结果与实测真树的测试结果吻合良好。

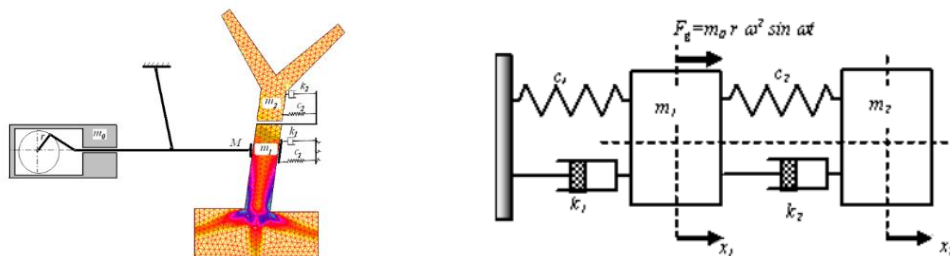


图 1-6 二自由度果树振动模型

Fig.1-6 Two-degree-of-freedom fruit tree vibration model

DAMIEN SELLIER 等^[40]对三棵 4 年生的海岸松进行建模，发现模型中分支模式的简化导致树苗自然频率被高估了 10%~20%。不适当的茎和根锚固刚度值产生了 10~20% 的误差，且不考虑分支振荡时，阀杆运动的阻尼减小了一半，这表明耗散机制的效率直接取决于树冠拓扑结构。

刘子龙等^[41]将“Y”型海棠树主干、主枝、侧枝视为 3 个质量块，建立振动模型并运用 Matlab 求解，如图 1-7 所示。结果表明：仿真与试验结果吻合程度较好，建立的果树模型能够较好地反映果树振动情况。魏庭鹏等^[42]则将“Y”型树简化为双自由度的质量—刚度—阻尼力学模型，通过模型的仿真求解和试验对果树振动共振频率进行研究，结果

表明仿真与试验一致性较好。

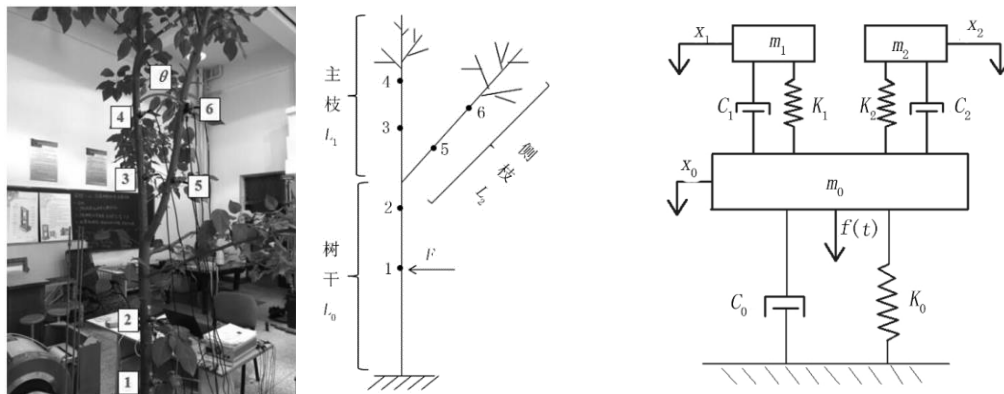


图 1-7 果树及果树简图

Fig.1-7 Fruit tree and fruit tree diagram

鲍玉冬^[43,44]建立了蓝莓灌木枝、主根及粘连土壤的灌木振动模型，将各级枝干等效为悬臂梁，悬臂梁的个数取决于灌木品种的主枝平均数量。频率范围在 16~18 Hz 时副枝模型获得的振幅较大，激振频率接近 20 Hz 时整株模型可获得较大振幅。

丁凯^[45]对不同生长年限枣树进行测量，分别建立了 3 年生、5 年生和 8 年生的枣树模型。结果表明随着枣树生长年限不断增加，枣树模型对应的共振频率不断减小。何苗等^[46]建立了枸杞植株的三维模型，获得了枸杞植株的前 10 阶固有频率范围和最佳激振频率。林欢等^[47]用激光扫描的方法对多级 Y 型银杏树进行了三维重建，发现在同一阶模态中仅有一个或几个树枝能同时显著振动，在某个特定频率下对银杏树激振并不能引起所有树枝的振动。Yan Xuan 等^[48]用二维激光雷达扫描的方法对单分枝和 Y 型分枝银杏树进行了建模，如图 1-8 所示，发现单枝银杏树和 Y 型银杏树频谱特性存在差异。

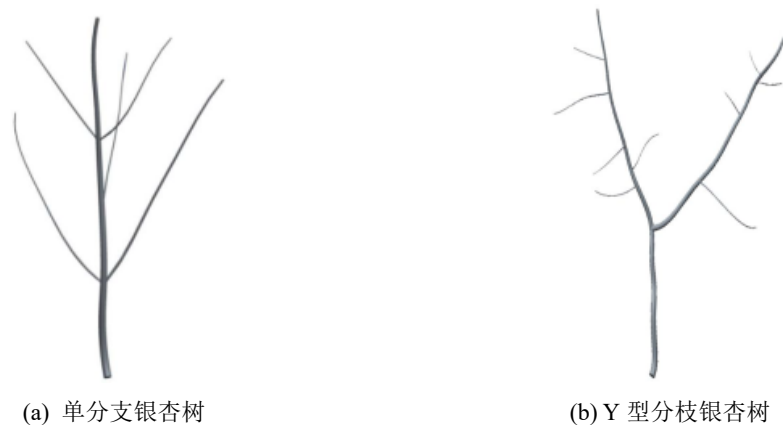


图 1-8 银杏树建模

Fig.1-8 Ginkgo tree modeling

除上述果树建模方法外，杨广元^[49]使用 SFM 算法进行了枣树实体模型的重建，对稠密点云模型预处理后通过曲线拟合方法和曲面拟合的方法获取枣树的三维实体模型。ChuanYu Wu 等^[50]利用两幅不同视角图像对无叶山核桃树进行了三维重建，用“条纹规划”