doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.022

绳索约束油茶树主干自然频率计算与试验

唐乐为[1,2]　张慧宇[1]　潘　睿[1]　万子平[1,2]　吴明亮[1,2]

(1.湖南农业大学机电工程学院,长沙 410128;2.特色油料作物(油茶)全程机械化科研基地,长沙 410128)

摘要:针对油茶果传统采摘方式人工劳动强度大、采收成本高等突出问题,亟需深入研究油茶果机械化高效采收方式。为有效提高油茶果振动式采收方式的能量利用率,提出轻质柔性绳索驱动方式代替传统刚性激振方式。采用树体二分叉基本单元,增加绳索约束,构建绳索-树体简化系统。分析简化系统能量传递过程,推导在绳索约束下油茶树主干自然频率表达式。基于圆台形树枝理想模型假设,提出变截面树枝弯曲弹性模量测量方法。以湖南省油茶品种为应用实例,测量树体及绳索参数,计算绳索-树体简化系统主干理论自然频率。对比绳索-树体简化系统主干自然频率理论值、仿真值及试验值,得到绳索-树体简化系统主干自然频率理论值与仿真值相对误差均小于6.4%,并且理论值与试验值相对误差均小于8.6%,验证了绳索约束油茶树二分叉基本单元主干自然频率计算公式的准确性。通过变截面树枝弯曲弹性模量测定法与传统三点弯曲试验结果进行对比,树体弯曲弹性模量平均值相对误差在7%以内,验证了变截面树枝弹性模量测定方法有效性。研究结果可为索驱动油茶果主干振动式采摘机设计提供理论依据。

关键词:绳索-树体简化系统;树体二分叉基本单元;绳索约束;弯曲弹性模量;自然频率

中图分类号:S718.43　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)04-0224-10　　**OSID**:

Experiment on Calculation Method of Natural Frequency of Trunk for *Camellia oleifera* with Constrained Cables

TANG Lewei[1,2]　ZHANG Huiyu[1]　PAN Rui[1]　WAN Ziping[1,2]　WU Mingliang[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*
2. *Specialty Oil Crop* (*Camellia oleifera*) *Full Mechanization Research Center*, *Changsha* 410128, *China*)

Abstract: The problems of high manual labor intensity as well as high harvesting cost become more serious for *Camellia oleifera* industry, which promote the research of *Camellia oleifera* harvesting technologies with high efficiency. In order to effectively improve the energy utilization rate of mechanized harvester of *Camellia oleifera* fruit, the cable-driven excitation approach was employed with negligible cable mass to replace the traditional rigid vibration. Based on a bifurcated basic unit of tree, cable-tree reduced system was constructed with considering two constrained cables. The energy transfer mechanism in the reduced system was investigated to deduce the calculation formula of natural frequency. An ideal truncated cone model with variable circular cross sections for branches was utilized, and the measurement approach of measuring elasticity modulus of branches with variable cross-sections was presented. Taking *Camellia oleifera* varieties in Hunan Province as an application example, the basic parameters of the tree and the cable were measured, the natural frequency of the cable-tree reduced system was obtained. The theoretical values of the natural frequency for the cable-tree reduced system were compared with simulation and the experimental results. It showed that the relative errors of simulation results and theoretical results were less than 6.4%, the relative errors of the experimental results and the theoretical results were less than 8.6%, which verified the efficiency of the proposed calculation formula of natural frequency for *Camellia oleifera* with constrained cables. By comparing the resulting modulus of elasticity from the presented measurement approach and the conventional three-point bending test, the relative measuring error was within 7% and thus the feasibility of the presented measurement approach was

收稿日期:2025-06-07　修回日期:2025-09-09

基金项目:国家自然科学基金青年项目(52305020)、湖南省自然科学基金项目(2025JJ50176)和湖南省科技创新计划资助项目(2025RC3171)

作者简介:唐乐为(1988—),男,副教授,博士,主要从事农业机械自动化设计研究,E-mail:tanglw@hunau.edu.cn

validated. The research results can provide a theoretical basis for the design of a flexible cable-driven branch-vibrating harvester for *Camellia oleifera* fruits.

Key words: cable – tree reduced system; bifurcated basic unit of tree; cable constraint; modulus of elasticity; natural frequency

0　引言

油茶是我国特有的木本油料树种，其栽培和油用历史悠久。油茶适宜种植在我国南方丘陵山区，主要分布在湖南、江西、广西、海南和贵州等省份。截至 2023 年底，我国油茶种植总面积达 4.87×10^7 hm^2；茶油年产量超过 8×10^5 t，约占国内食用植物油总产量的 7%，位于居民食用植物油消费量前十位[1]。发展油茶产业，可促进南方丘陵山区林农持续增收[2]。“十四五”林业草原保护发展规划纲要明确提出，到 2025 年油茶种植面积超过 6×10^7 hm^2，茶油年产量达到 2×10^6 t[3]。《加快油茶产业发展三年行动方案(2023—2025 年)》强调，既要扩大油茶种植面积，还要推进油茶果采收智能机械装备研发与应用[4]。近年来油茶种植面积持续扩大，引发劳动力短缺从而造成采收成本高、劳动强度大等问题，进一步促使油茶果机械化采收设备研发向智能高效的应用方向发展[5-6]。

油茶果机械采收方式主要分为齿梳式[7]、振动式[8-9]和胶辊式[10]3 类，油茶果振动式采收的采摘效率最高[11-17]。油茶果振动式采摘基础理论，包含油茶树体模型构建[18-19]、激振参数研究[20-24]、振动加速度响应与激振频率的关系研究[25-28]，以及油茶树体一阶自然频率经验公式推导[29]。许林云等[19]提出一种结合激光点云信息与有限元技术的建模方法，通过提取树体骨架节点和节点树枝半径，构建果树三维空间有限元树体模型。伍德林等[21]采用五自由度的质量-弹簧-阻尼系统构建果树动力学模型。上述两者模型为树体本体模型，未考虑激振部件与树体连接对树体动力学模型的影响。CASTRO-GARCIA 等[27]发现影响振动式油橄榄采摘率的主要因素有采收频率、振动时间和树干夹持位置；HORVATH 等[28]研究发现在夹持油橄榄树干进行激振时，主根-土壤部分也会产生激振响应，消耗部分输入能量，并在树干低夹持点激振时易造成树根损伤；杨会民等[24]研究激振时间、激振频率和激振振幅等因素对杏树振动特性的影响，并确定杏树最优振动采收参数组合：激振时间 7.207 s、激振频率 15 Hz 和激振振幅 10 mm。上述研究应用对象为油橄榄和杏树，面向油茶果最优振动采收参数研究尚不足。张诗怡等[29]构建油茶树二分叉基本单元的动力学模型，推导基于带端部质点的悬臂梁一阶自然频率计算公式，采用参数辨识方法推导二分叉基本单元一阶自然频率经验公式，但仅研究树体自身固有频率。虽然前期研究提出了一种索驱动油茶果振动采收方式[30]，但驱动绳索约束对绳索-树体系统自然频率的影响尚未明确，难以确定最佳采收激振频率。故在文献[29]基础上，增加绳索连接主干，研究油茶树-绳索模型振动特性，为绳索驱动油茶果振动采摘装备设计提供理论依据。

对比现有油茶果振动采收装备的刚性驱动方式[31]，绳索驱动激振方式能有效提高能量利用率，降低刚性驱动方式夹持导致的树干表皮和根部损伤。此外，轻质绳索能产生高频采收振动，适用于林果振动式采收。

综上所述，国内外研究学者已深入研究刚性驱动激振参数对林果采收的影响规律，但柔性绳索驱动林果采收机理鲜有研究。本文以柔性绳索和油茶树体二分叉基本单元为研究对象，建立绳索-树体约束下简化系统模型，以求得在绳索约束条件二分叉油茶树干自然频率。以期为柔性绳索驱动振动式油茶果采摘机激振参数设置提供理论依据。

1　绳索约束二分叉树体简化系统

采用柔性绳索驱动油茶树体产生振动，绳索需要通过机械手爪连接到树体形成绳索-手爪-树体系统。轻量化抓持系统设计要求机械手爪和绳索及树体连接可靠无滑移，因此将绳索-手爪-树体系统简化为绳索-树体简化系统进行分析。进而，绳索-树体简化系统由树体二分叉基本单元组成，分为二分叉树干、二分叉树枝及柔性绳索，如图 1 所示。长度为l_1的树体主干一端固定在地面，另一端连接对称生长的两根树枝[29]。定义树枝长度为l_2，每根树枝轴线相对于主干轴夹角为φ_b。在距离树干与地面固定端水平方向 l 处固定柔性绳索一端，绳索另一端与树干连接，且绳索-树干连接点与树干-树枝连接点距离定义为 Δl。在绳索约束下树体二分叉基本单元自由振动时，定义 θ 表示树干偏转角度，φ 表示树体分枝偏转角度，如图 2 所示。绳索原始长度为l_c，绳索长度变化量为 Δx。

1.1　绳索约束树体自然频率计算

对于绳索-树体简化系统，已知树体二分叉基本

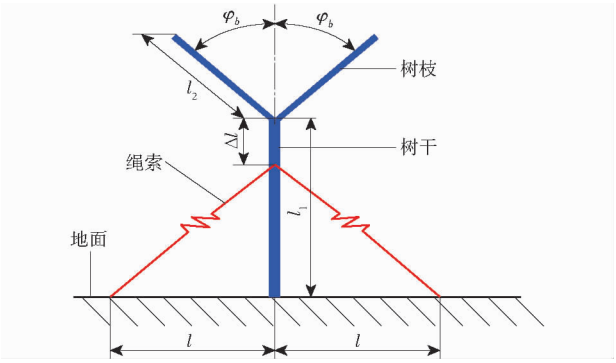


图 1 绳索-树体简化系统

Fig. 1 Cable - tree reduced system

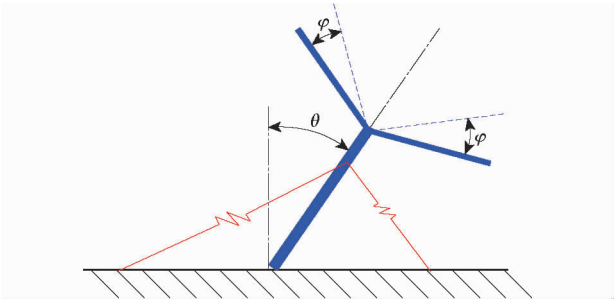


图 2 绳索-树体简化系统自由振动

Fig. 2 Free vibration of cable - tree reduced system

单元弹性势能之和[29]为

$$V=\frac{1}{2}\left(\frac{3EI_1}{l_1}\theta^2+\frac{6EI_2}{l_2}\varphi^2\right) \tag{1}$$

式中 E——树体弯曲弹性模量,MPa

I_1、I_2——树干和树枝截面惯性矩,mm^4

已知树体二分叉基本单元一阶自然频率经验公式[29]为

$$f=\frac{1}{2\pi}\cdot\sqrt{\frac{3EI_1}{\frac{33}{140}ml_1^3+2.9\rho\pi\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 l_2 l_1\left(l_1^2+\frac{1}{3}l_2^2+l_1l_2\cos\varphi_b\right)}} \tag{2}$$

式中 m——树干质量,kg

ρ——树枝密度,取 1 038 kg/m^3[29]

d_2——分枝直径,mm

在绳索约束下树体二分叉基本单元自由振动产生偏移,得到绳索原始长度 l_c 以及自由振动时绳索产生的偏移量 Δx 分别为

$$l_c=\sqrt{(l_1-\Delta l)^2+l^2} \tag{3}$$

$$l_c+\Delta x=\sqrt{(l+l_1\sin\theta-\Delta l\sin\theta)^2+(l_1\cos\theta-\Delta l\cos\theta)^2} \tag{4}$$

$$(\Delta x)^2=(l_c+\Delta x)^2+l_c^2-2(l_c+\Delta x)l_c \tag{5}$$

式中 l——树干轴线与绳索地面固定端距离

假设绳索简化为弹性系数 k 的单向拉伸弹簧,绳索-树体简化系统的总弹性势能为树体二分叉基本单元弹性势能与绳索弹性势能之和,则绳索-树体简化系统总弹性势能为

$$V=\frac{1}{2}\left(\frac{3EI_1}{l_1}\theta^2+\frac{6EI_2}{l_2}\varphi^2\right)+\frac{k}{2}\left[(l+l_1\sin\theta-\Delta l\sin\theta)^2+(l_1\cos\theta-\Delta l\cos\theta)^2\right]+\frac{k}{2}\left[(l_1-\Delta l)^2+l^2\right]-k\sqrt{(l_1-\Delta l)^2+l^2}\cdot\sqrt{(l+l_1\sin\theta-\Delta l\sin\theta)^2+(l_1\cos\theta-\Delta l\cos\theta)^2} \tag{6}$$

将扩展的哈密顿原理[32]应用于绳索-树体简化系统,哈密顿原理公式为

$$\int_{t_0}^{t_1}(\delta T-\delta V+\delta W)\,\mathrm{d}t=0 \tag{7}$$

在绳索-树体简化系统树体主干自由振动下($\varphi=0$),得到总弹性势能微分为

$$\delta V=\left[3EI_1+k\frac{(l_1-\Delta l)^3l^2}{l^2+(l_1-\Delta l)^2}\right]\frac{\theta}{l_1}\delta\theta \tag{8}$$

将式(8)和简化系统总动能代入式(7),且外力不作功 $\delta W=0$,得到绳索约束树体二分叉基本单元自然频率经验计算式为

$$f=\frac{1}{2\pi}\cdot\sqrt{\frac{3EI_1+k(l_1-\Delta l)^3\frac{l^2}{l^2+(l_1-\Delta l)^2}}{\frac{33}{140}ml_1^3+2.9\rho\pi\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 l_1l_2\left(l_1^2+\frac{1}{3}l_2^2+l_1l_2\cos\varphi_b\right)}} \tag{9}$$

1.2 变截面树枝弹性模量

观察发现油茶树体截面直径呈非均匀变化特点。为准确测量树枝弹性模量,构建变截面圆台形树枝理想模型。变截面圆台形悬臂梁在自由端受到集中力 F 作用下产生偏移,如图 3 所示。定义悬臂梁长度为 L。

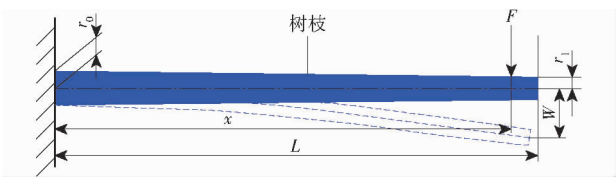


图 3 变截面圆台形树枝理想模型

Fig. 3 Ideal truncated cone model with variable circular cross section for branch

在集中力 F 作用下,悬臂梁弯矩分布为

$$M(x)=F(x-L) \tag{10}$$

式中 x——从固定端到计算截面的距离,m

忽略剪切力并基于小变形假设[33],挠曲线方程为

$$W''(x)=-\frac{M(x)}{EI(x)} \tag{11}$$

假设截面半径 $r(x)$ 沿悬臂梁长度呈线性变化，即从固定端处半径 r_0 逐渐变为自由端处半径 r_1，则悬臂梁半径随距离 x 变化的表达式为

$$r(x) = r_0 + \frac{r_1 - r_0}{L} \tag{12}$$

树枝圆截面惯性矩计算式为

$$I(x) = \frac{\pi (r(x))^4}{4} \tag{13}$$

将式(12)代入式(13)得

$$I(x) = \frac{\pi \left(r_0 + \frac{r_1 - r_0}{L}x\right)^4}{4} \tag{14}$$

将式(10)和式(14)代入式(11)，得挠曲线方程

$$W''(x) = \frac{4F(L-x)}{E\pi \left(r_0 + \frac{r_1 - r_0}{L}x\right)^4} \tag{15}$$

令 $\frac{r_1 - r_0}{L} = a$，$r_0 = b$，则

$$W''(x) = \frac{4F(L-x)}{E\pi (ax+b)^4} \tag{16}$$

考虑边界约束条件，在固定端 $x = 0$ 处，梁固定且无旋转，故挠度 $W(0) = 0$，转角 $W'(0) = 0$。对式(16)沿悬臂梁 x 长度方向积分，得到变截面圆台形树枝挠度公式为

$$W = \frac{2x^2(3bL - bx + 2aLx)F}{3b^3(ax+b)^2 E\pi} \tag{17}$$

因此，变截面圆台形树枝弹性模量 E 表达式为

$$E = \frac{2x^2(3bL - bx + 2aLx)F}{3b^3(ax+b)^2 \pi W} \tag{18}$$

2　树体及绳索参数测定试验

在振动式采摘过程中，对油茶树体使用特定频率进行激振，提高油茶果采摘效率。为确定绳索约束树体主干自然频率，需要测量树体弯曲弹性模量 E 和绳索弹性系数 k。首先，采用动态信号分析仪，测量 7 组绳索-树体简化系统的自然频率；然后，采用万能试验机测定柔性绳索弹性模量，确定柔性绳索弹性系数；最后，进行变截面树枝弯曲弹性模量测定试验及树枝三点弯曲弹性模量测定对比试验，2 种方法各进行 3 组试验。

2.1　试验仪器和材料

柔性绳索参数测定试验于 2024 年 8 月在湖南农业大学第八教学楼实验室进行，试验设备包含万能试验机(型号：LD23.104，精度：0.008 mm，品牌：力试(上海)科学仪器公司)、数显游标卡尺(精度：0.01 mm)；树枝弹性模量测定及树枝振动模拟试验于 2025 年 5 月在湖南农业大学油茶基地精工楼实验室进行，试验设备包含型号 LD23.104 万能试验机、数显游标卡尺(精度：0.01 mm)、角度测量仪(精度：0.1°)、柔性绳索、激光三角位移传感器(型号：LK－H150，精度：0.25 μm，品牌：基恩士(KEYENCE))、动态信号分析仪(型号：DP906，品牌：美国 Data Physics(迪飞 DP)公司)、铝型材台架、振动试验树枝夹具(型号：金属雨伞夹)、绳索夹具(型号：A－001，夹口宽度：15 mm，可夹厚度：0～3.5 mm)、树枝弹性模量试验树枝夹具(型号：同径双孔十字夹 5×5)、砝码若干(规格：2、5 g)。

2.2　绳索-树体简化系统自然频率测定试验

在油茶树体上选择二分叉油茶树枝进行试验，将树枝夹具以及绳索夹具固定在试验台架，2 个绳索夹具分别固定于树枝夹具左右两端相等距离处。树枝夹具夹紧二分叉油茶树枝底部，二分叉油茶树枝主枝连接 2 根柔性绳索，2 根绳索另一端分别用绳索夹具固定，绳索-树体简化系统基础参数测量结果见表 1。将动态信号分析仪的加速度传感器固定在主枝上，试验布置如图 4 所示。将分枝从静止平衡位置拉到一定距离(尽量保持分枝与绳索始终在一个平面内)后突然释放，记录绳索-树体简化系统自然频率，选取其中 3 组振动频率测试结果，如图 5 所示，具体数据见表 2。

表 1　绳索-树体简化系统基础参数

Tab.1　Basic parameters of cable－tree reduced system

组别	主干直径 d_1/mm	主干长度 l_1/mm	分枝直径 d_2/mm	分枝长度 l_2/mm	主干与绳索固定端长度 l/mm	主干轴夹角 φ_b/rad
1	4.97	105.71	3.36	85.89	130	0.434 6
2	5.89	118.08	3.96	90.85	130	0.441 6
3	6.73	136.61	4.06	97.91	130	0.392 7
4	6.07	109.84	4.85	91.36	130	0.401 4
5	5.55	140.52	4.02	121.89	130	0.321 1
6	5.96	113.41	4.16	90.03	130	0.432 8
7	7.42	109.90	5.32	90.50	130	0.335 1

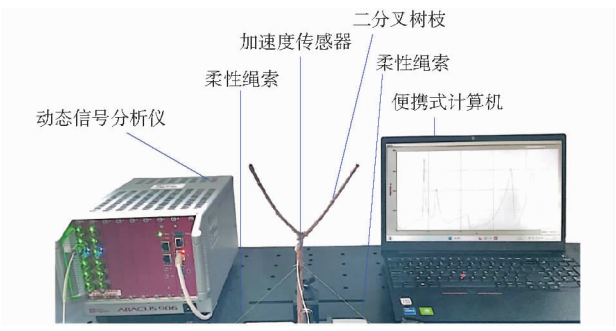


图 4　绳索-树体简化系统自由振动试验

Fig.4　Free vibration test of cable－tree reduced system

图 5 中，每组图依次为树体-绳索简化系统一阶自然频率、绳索-树干连接点与树干-树枝连接点距离为 0、0.25l_1、0.5l_1、0.75l_1、l_1 绳索-树体简化系统

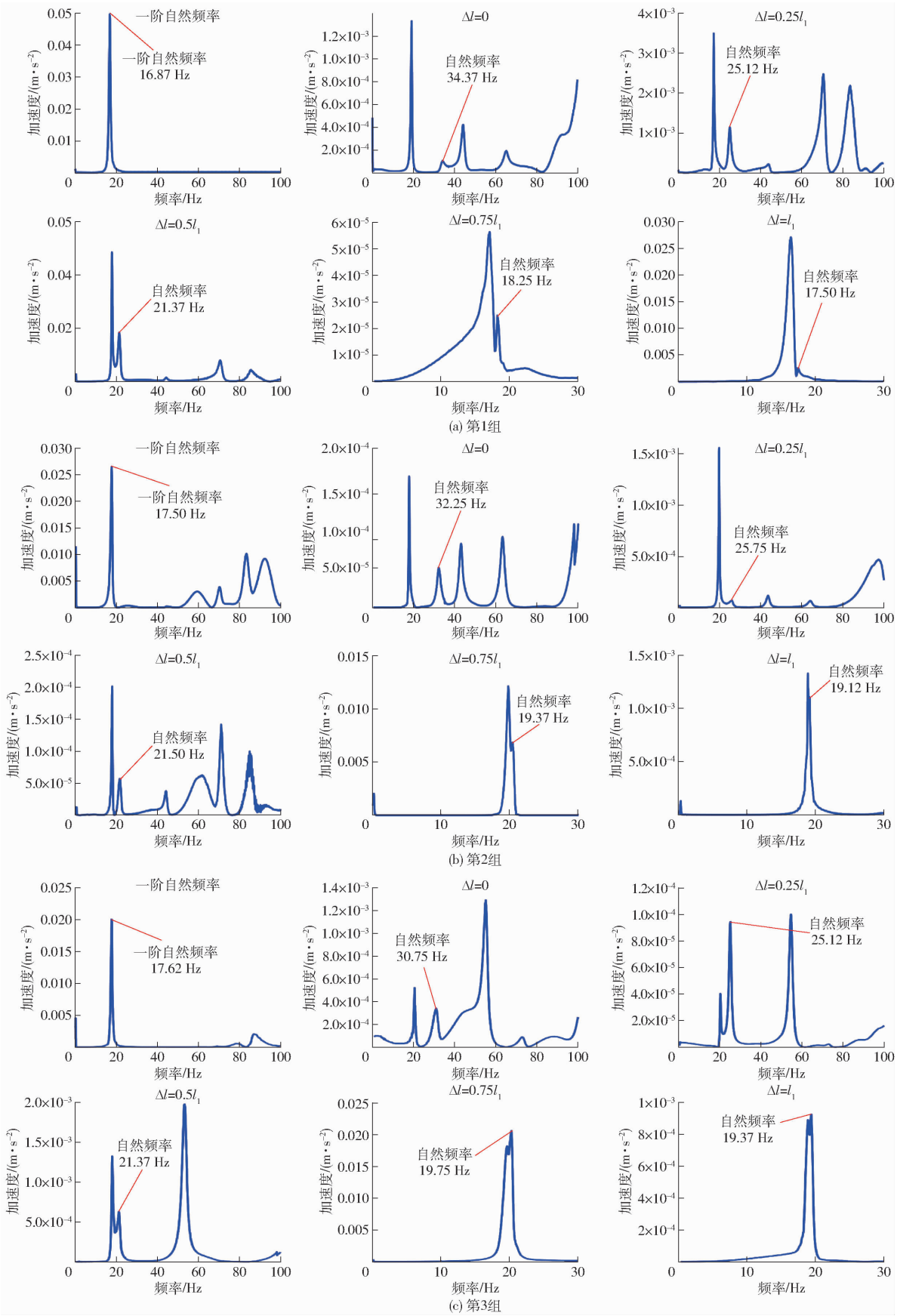


图 5 绳索-树体简化系统自然频率试验

Fig. 5 Natural frequency testing for cable - tree reduced system

的第 2 阶自然频率。

固有频率与外界激励无关,是树体的一种固有属性。在自由振动试验中,未限制树干在垂直于绳索-树体简化系统平面的自由振动。经过有限元仿真试

表 2　绳索-树体简化系统自然频率试验值

Tab. 2　Measured natural frequency for cable - tree reduced system　Hz

组别	$k=0$	$\Delta l=0$	$\Delta l=0.25l_1$	$\Delta l=0.5l_1$	$\Delta l=0.75l_1$	$\Delta l=l_1$
1	16.87	34.37	25.12	21.37	18.25	17.50
2	17.50	32.25	25.75	21.50	19.37	19.12
3	17.62	30.75	25.12	21.37	19.75	19.37
4	15.31	28.31	22.88	19.25	15.63	15.57
5	9.75	24.31	19.69	13.81	10.63	10.31
6	20.63	32.88	28.75	23.44	19.51	19.06
7	21.63	31.75	27.06	23.87	21.62	21.13

验，如图 6 所示，第 1 个频率峰值对应垂直于绳索-树体简化系统所在平面的摆动，绳索作用忽略不计。

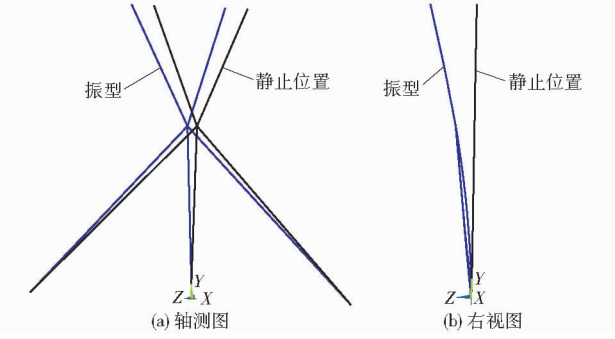


图 6　绳索-树体简化系统第 1 阶自然频率及振型仿真

Fig. 6　Simulation of first-order natural frequency and modal shape of cable - tree reduced system

2.3　柔性绳索拉伸试验

选取 100 mm 柔性绳索，使用万能试验机拉力夹具夹持绳索两端，以 5 mm/min 匀速拉伸绳索，直至绳索断裂，试验布置如图 7 所示。对 10 组绳索进行拉伸试验，测得柔性绳索弹性模量。绳索弹性模量计算公式为

$$E=\frac{kL_1}{A}$$

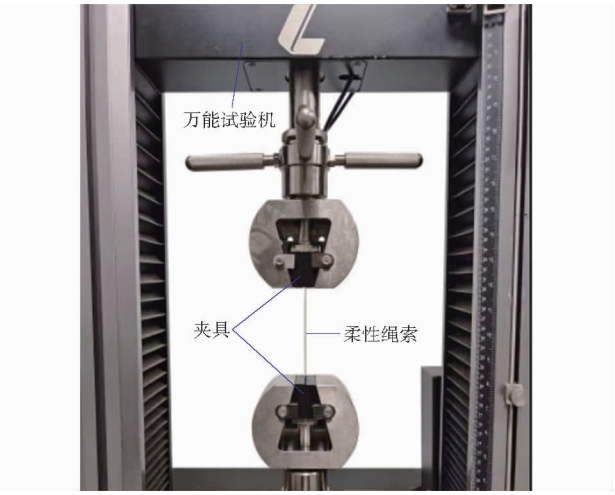


图 7　绳索拉伸试验

Fig. 7　Tensile test of cables

式中　L_1——绳索长度，m

A——绳索横截面积，m^2

绳索拉伸试验计算得到绳索弹性系数 k，测量结果见表 3。

表 3　柔性绳索基础参数测量结果

Tab. 3　Basic parameter measurement result of cable

组别	弹性模量/MPa	弹性系数/(N·m^{-1})
1	288	322.15
2	277	360.63
3	237	328.76
4	271	320.93
5	353	394.26
6	349	360.33
7	240	294.22
8	247	335.86
9	244	301.30
10	345	366.92
平均值	285.10	338.54

2.4　变截面树枝弹性模量测定试验

在铝型材台架上使用支柱固定夹成品作为树枝夹具(同径双孔十字夹支柱固定夹)固定树枝，树枝呈水平位置。柔性绳索一端系于树枝自由末端，另一端自由下垂悬挂砝码。在树枝系绳处正上方固定激光三角位移传感器，用于记录树枝挠度，试验布置如图 8 所示。

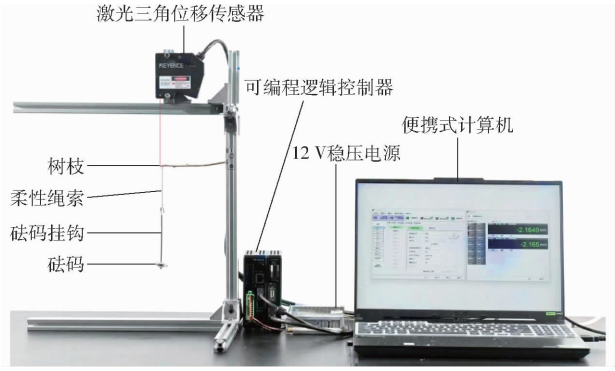


图 8　树枝挠度试验

Fig. 8　Deflection test of branch

变截面树枝弹性模量测定试验方案，以树枝悬挂挂钩为挠度变化基准，静置 5 min 后依次叠加砝码，并测量挠度。考虑树枝挠度变化缓慢，每增加一次质量，静置 5 min 后再记录挠度数据并增加质量。砝码依次放置总质量分别为 2、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14、15、16、17、18、20、22 g。记录每个质量所对应的挠度，其中 3 组拟合挠度-质量趋势线，如图 9 所示。代入式(18)，计算树枝弹性模量，计算结果见表 4。

2.5　三点弯曲弹性模量测定试验

为验证变截面挠度公式与试验设计正确性，在

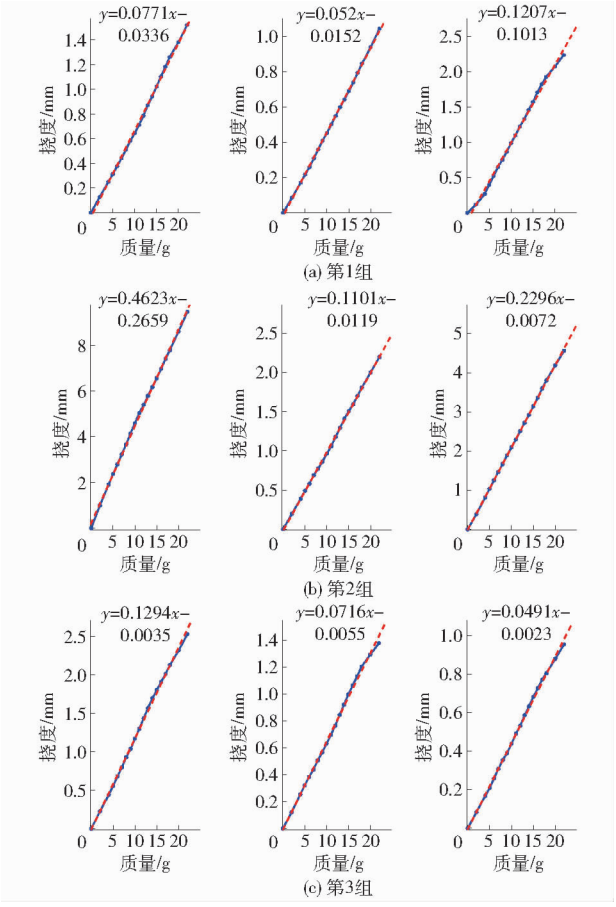


图 9 挠度与质量关系曲线

Fig. 9 Curves of deflection to mass relationship

表 4 树枝弹性模量计算结果

Tab. 4 Experimental calculated elastic modulus for tree branches

组别	树枝长度/mm	受力点长度/mm	固定端直径/mm	自由端直径/mm	挠度质量比值/(mm·g^{-1})	弹性模量/MPa
1	96.35	91.27	5.63	5.51	0.077 1	737.42
	98.72	93.14	6.23	6.08	0.052 0	781.61
	103.11	99.29	5.53	4.69	0.120 7	731.84
2	108.41	106.76	4.01	3.54	0.462 3	800.35
	128.01	124.46	6.32	6.04	0.110 1	812.69
	146.82	140.68	5.72	5.54	0.229 6	845.59
3	105.82	101.97	5.17	4.93	0.129 4	862.17
	100.56	96.97	5.77	5.42	0.071 6	875.64
	96.16	92.23	6.16	5.85	0.049 1	843.27

变截面树枝弹性模量测定试验后,立即使用相同树枝进行三点弯曲试验测定树枝弹性模量[29]。设置试验跨距为 50 mm,压头速度为 5 mm/min,试验结果见表 5。

3 理论验证

3.1 树枝弹性模量对比

树枝变截面挠度试验与三点弯曲试验得到的树枝弹性模量对比,选取其中 3 组数据如表 6 所示,弹性模量相对误差平均值均在 7% 以内。2 种测量方法得到树枝弹性模量存在误差,其原因在于树枝中间有相应结节,导致树枝直径有较大变化,但推导公式中理想模型直径与长度呈线性变化,结节处直径与长度在线性变化上有偏差,最终导致弹性模量存在偏差。

表 5 树枝三点弯曲弹性模量试验结果

Tab. 5 Measurement results of elastic modulus for branch (three-point bending testing)

组别	树枝直径/mm	弹性模量/MPa
1	5.57	787.61
	6.11	810.04
	4.94	734.04
平均值	5.54	777.23
2	3.93	733.91
	6.05	890.96
	5.67	860.79
平均值	5.22	828.56
3	4.98	834.94
	5.58	861.87
	6.07	921.09
平均值	5.54	872.64

表 6 弹性模量计算值与试验值对比

Tab. 6 Comparison of calculated elastic modulus from formula with experimental result

组别	弹性模量计算值/MPa	弹性模量试验值/MPa	相对误差/%
1	737.42	787.61	6.81
	781.61	810.04	3.64
	731.84	734.04	0.30
平均值	759.52	777.23	3.58
2	800.35	733.91	8.30
	812.65	890.96	9.63
	845.59	860.79	1.79
平均值	819.55	828.56	6.58
3	862.17	834.94	3.16
	875.64	861.87	1.57
	843.26	921.09	9.23
平均值	860.36	872.64	4.65

3.2 绳索-树体简化系统自然频率对比

当绳索固定在主干底端时,绳索-树枝简化系统振动频率接近一阶自然频率,选取其中 3 组数据进行对比,具体数据如图 10 所示。对比绳索-树枝简化系统自然频率理论值与试验值,3 组绳索-树枝简化系统自然频率相对误差均在 8.6% 以内。绳索-树枝简化系统自然频率理论值与试验值存在误差,其原因在树枝使用夹具固定,实际试样主干长度略短于实际测量长度;与此同时,绳索固定在树枝主

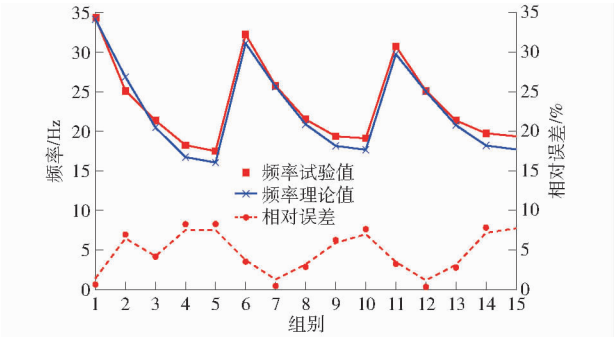


图 10　绳索-树体简化系统自然频率理论值与试验值对比

Fig. 10　Comparison of theoretical frequency from formula of cable - tree reduced system and verification test

干时，绳索-树干连接点与树干-树枝连接点距离存在一定测量误差。自然频率对比结果验证了绳索约束下油茶树体二分叉基本单元自然频率计算方法的准确性。

4　分析与讨论

为进一步验证绳索-树体简化系统自然频率变化规律，利用 ANSYS - APDL 软件对 3 组不同参数绳索-树体简化系统进行仿真，按实测参数在 ANSYS 中构建绳索-树体简化系统，使用 COMBIN39 非线性单向弹簧进行仿真，有限元模型如图 11 所示。ANSYS 仿真模型配置为网格单元数 92，树体主干与地面连接边界(0,0,0)，绳索材料弹性系数 338.54 N/m，树体材料弹性模量 860.36 MPa、密度 1 038 kg/m^3，泊松比 0.3。选取其中 3 组数据进行对比，3 组绳索-树体简化系统的仿真结果如图 12 所示。将树体模型基础参数代入式(9)绳索约束树体二分叉基本单元自然频率经验计算式，对比绳索-树体简化系统自然频率理论值与仿真值结果，3 组树体自然频率相对误差均在 6.4% 以下。

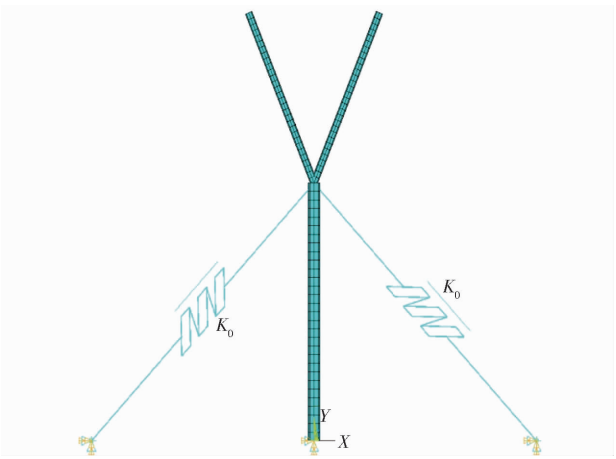


图 11　绳索-树体简化系统有限元模型

Fig. 11　Finite element model of cable - tree reduced system

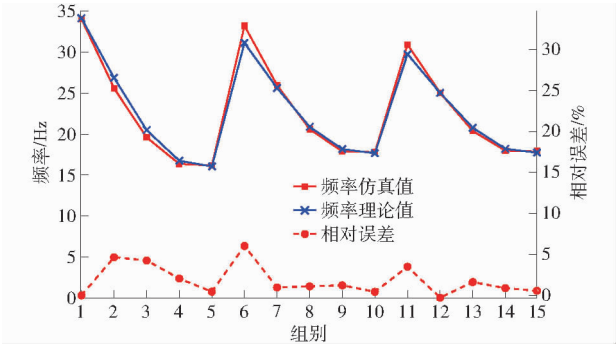
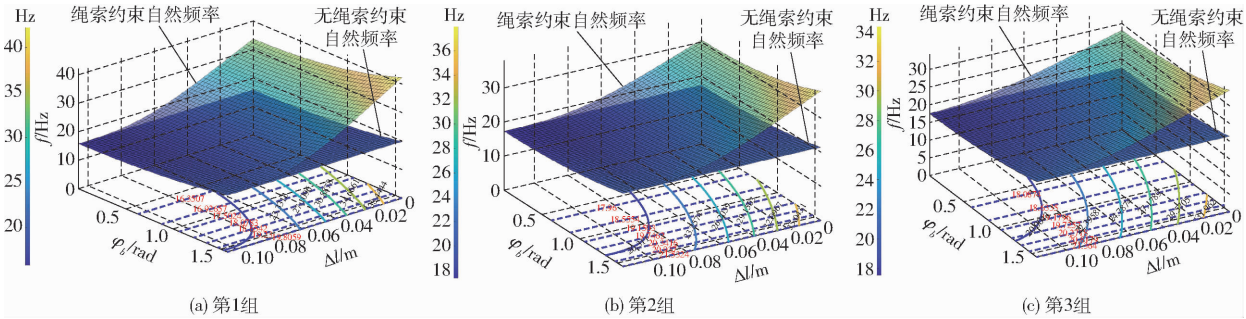


图 12　绳索-树体简化系统自然频率理论值与仿真值对比

Fig. 12　Comparison of theoretical frequency from formula of cable - tree reduced system and simulation value from ANSYS

为进一步探究绳索-树体简化系统自然频率 f 随绳索-树干连接点距离 Δl 以及分枝轴线相对于主干轴夹角 φ_b 的变化规律，利用 Matlab 软件绘制不同参数组合对应的自然频率分布图。为简化分析过程，设定离主干与地面固定端水平方向 l 为 130 mm，规定 Δl 取 0 ~ l_1、夹角 φ_b 取 0 ~ $\frac{\pi}{2}$。根据式(9)，绘制 f 随 Δl 和 φ_b 变化的三维图，展示主干连接点和树形夹角对绳索-树体简化系统自然频率的影响，如图 13 所示。图 13 中，半透明曲面代表绳索约束下简化系统的自然频率分布；不透明曲面表示无绳索约束下树体二分叉基本单元随树形夹角变化的自然频率分布情况。经观察发现绳索约束下树体自然频率发生了较大提升，且提升幅度与树形基本参数、绳索-树干连接点距离均相关。为了更清晰对比有无绳索约束下简化系统自然频率大小，在水平面内绘制了两曲面等高线。其中，虚线对应无绳索



(a) 第1组　　(b) 第2组　　(c) 第3组

图 13　自然频率随主干连接点距离、树形夹角的变化趋势

Fig. 13　Variations of natural frequency with trunk distance of connecting point and angle

约束树体二分叉基本单元自然频率等高线;实线对应绳索约束下简化系统自然频率等高线。因为无绳索连接点距离约束,在图 13 中水平面内所有虚线均为直虚线。

由图 13 可知,3 组试样自然频率变化总趋势基本一致。即在同一树形夹角条件下,自然频率随主干连接点距离增加而减小;在同一主干连接点位置时,自然频率随树形夹角单调递增。因此,当主干连接点取最大值且树形夹角取最小值时,简化系统自然频率取最小值。由于第一组试样弹性模量 E 较小,主干直径d_1、分枝直径d_2、主干长度 l_1、分枝长度 l_2均更小,故第 1 组简化系统自然频率最大值大于第 2 组、第 3 组简化系统自然频率最大值。3 组试样系统频率最高值均出现在树形夹角最大、主干连接点距离最小处,体现了绳索约束条件对树体动态特性的影响。

5 结论

(1)建立了绳索-树体简化系统模型,推导简化树体二分叉基本单元主干自然频率计算表达式。基于悬臂梁挠度公式,采用积分法,提出一种变截面圆台形树枝弹性模量测量方法。搭建绳索约束下油茶树体二分叉基本单元自由振动试验,验证了简化系统自然频率计算方法的有效性。

(2)在树体二分叉基本单元模型基础上,考虑绳索约束条件,建立绳索-树体简化系统,从能量传递角度推导得到简化系统自然频率表达式,分析发现绳索约束会显著提高系统刚度,进而提高系统自然频率。

(3)对比变截面圆台形树枝弹性模量测试值与三点弯曲弹性模量测试值,结果显示相对误差均小于 7%,说明面向油茶树枝弹性模量测量,两种方法均可靠。

(4)采用绳索-树体简化系统自然频率计算公式,所得自然频率理论值与仿真值相对误差均小于 6.4%,所得自然频率理论值与试验值相对误差小于 8.6%,验证了计算公式的准确性,为后续绳索驱动油茶果采收方式相应机具的研发提供了理论基础。

参 考 文 献

[1] 中国绿色时报. 拎稳“油瓶子”油茶产业如何焕新-国家林业和草原局[EB/OL]. (2024-12-12)[2025-01-09]. https://www.forestry.gov.cn/c/www/lcdt/599498.jhtml.

[2] 自然资源部. 国家林草局联合发文保障油茶生产用地-中国政府网[EB/OL]. (2022-06-08)[2025-01-09]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-06/08/content_5694551.htm.

[3] 国家林业和草原局. “十四五”林业草原保护发展规划纲要-中国政府网[EB/OL]. (2021-08-19)[2025-01-09]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-08/19/content_5632156.htm.

[4] 国家林业和草原局, 国家发展和改革委员会. 财政部关于印发《加快油茶产业发展三年行动方案(2023—2025 年)》的通知-中国政府网[EB/OL]. (2022-12-22)[2025-01-09]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-01/10/content_5736075.htm.

[5] 苑严伟, 白圣贺, 牛康, 等. 林果机械化采收技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 53-63.
YUAN Yanwei, BAI Shenghe, NIU Kang, et al. Research progress on mechanized harvesting technology and equipment for forest fruit[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(9): 53-63. (in Chinese)

[6] 郭传金. 油茶产业发展现状及其发展对策[J]. 农业开发与装备, 2021(8): 34-35.

[7] 高自成, 李立君, 李昕, 等. 齿梳式油茶果采摘机采摘执行机构的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 19-25.
GAO Zicheng, LI Lijun, LI Xin, et al. Development and test of picking actor in oil-tea camellia fruit picking machine of tooth comb type[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 19-25. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 高自成, 赵凯杰, 李立君, 等. 悬挂振动式油茶果采摘执行机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 9-17.
GAO Zicheng, ZHAO Kaijie, LI Lijun, et al. Design and experiment of suspended vibratory actuator for picking *Camellia oleifera* fruits[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 9-17. (in Chinese)

[10] 饶洪辉, 张立勇, 黄登昇, 等. 电动胶辊旋转式油茶果采摘执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 115-121.
RAO Honghui, ZHANG Liyong, HUANG Dengsheng, et al. Design and test of motor-driven picking actuator of camellia fruit with rotate rubber roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 115-121. (in Chinese)

[11] 郑永军, 江世界, 陈炳太, 等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 1-20.
ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 1-20. (in Chinese)

[12] 陈泽斌. 振动式林果采收技术的研究现状[J]. 机械工程师, 2021(1): 21-24.
CHEN Zebin. Research status of vibrating fruit harvesting technology[J]. Mechanical Engineer, 2021(1): 21-24. (in Chinese)

[13] 崔王斌, 周宏平, 许林云, 等. 我国林果机械振动式采收装备及理论研究进展[J]. 世界林业研究, 2023, 36(6): 64-70.

CUI Wangbin, ZHOU Hongping, XU Linyun. Research progress in mechanically vibratory harvesting equipment of forest fruit and its theory in China[J]. World Forestry Research, 2023, 36(6): 64 – 70. (in Chinese)

[14] 靳文停, 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): 114 – 160. (in Chinese)

[15] 伍德林, 傅立强, 曹成茂, 等. 摇枝式油茶果采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 176 – 182, 195.
WU Delin, FU Liqiang, CAO Chengmao, et al. Design and experiment of the shaking branch fruit picking machine for camellia fruit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 176 – 182, 195. (in Chinese)

[16] 伍德林, 李超, 曹成茂, 等. 摇枝式油茶果采摘装置作业过程分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 56 – 62.
WU Delin, LI Chao, CAO Chengmao, et al. Analysis and experiment of the operation process of branch-shaking type *Camellia oleifera* fruit picking device[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 56 – 62. (in Chinese)

[17] 王长勤, 许林云, 周宏平, 等. 偏心式林果振动采收机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 10 – 16.
WANG Changqin, XU Linyun, ZHOU Hongping, et al. Development and experiment of eccentric-type vibratory harvester for forest-fruits[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 10 – 16. (in Chinese)

[18] 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, 35(4): 19 – 24.
WENG Lingyun, XU Linyun. Analysis on mechanical model assumption of Y-trellis trees [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(4):19 – 24. (in Chinese)

[19] 许林云, 刘冠华, 周杰, 等. 用于振动采收的有果有叶果树振动模型构建[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 1 – 12.
XU Linyun, LIU Guanhua, ZHOU Jie, et al. Construction of the vibration model of the fruit trees with fruits and leaves for vibration harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(11): 1 – 12. (in Chinese)

[20] 李斌, 陆华忠, 吕恩利, 等. 荔枝树枝能量传递特性与去梗式振动采摘作业参数[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 18 – 25.
LI Bin, LU Huazhong, LÜ Enli, et al. Characterizing energy transfer of litchi branches and working parameters of destemmed vibrational picking[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(8): 18 – 25. (in Chinese)

[21] 伍德林, 赵恩龙, 姜山, 等. 基于能量传递规律的油茶树冠层振动参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 23 – 33.
WU Delin, ZHAO Enlong, JIANG Shan, et al. Optimization and experiment of canopy vibration parameters of *Camellia oleifera* based on energy transfer characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 23 – 33. (in Chinese)

[22] 陈志健. 面向机械振动采收的油茶树冠层识别与分析[D]. 合肥:安徽农业大学, 2021.
CHEN Zhijian. Identification and analysis of *Camellia oleifera* canopy for mechanical vibration harvesting[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[23] 杜小强, 倪柯楠, 潘珂, 等. 可调振幅单向拽振式林果采收机构参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 25 – 32.
DU Xiaoqiang, NI Ke'nan, PAN Ke, et al. Parameter optimization of stroke-adjustable and monodirectional pulling fruit harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16): 25 – 32. (in Chinese)

[24] 杨会民, 散鋆龙, 陈毅飞, 等. 不同振动特性参数对杏树振动响应的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 10 – 16.
YANG Huimin, SAN Yunlong, CHEN Yifei, et al. Influence of different vibration characteristic parameters on vibration response of apricot trees[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2): 10 – 16. (in Chinese)

[25] LIN Huan, XU Linyun, ZHOU Hongping, et al. Relationship between frequency spectrum characteristics and vibration responses of *Ginkgo biloba* trees during mechanical harvesting operation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 51 – 57.

[26] 林欢, 许林云, 宣言, 等. 林果振动加速度响应振型试验[J]. 林业工程学报, 2016, 1(1): 100 – 104.
LIN Huan, XU Linyu, XUAN Yan, et al. Experimental research on the vibration mode of fruit vibration acceleration response [J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(1): 100 – 104. (in Chinese)

[27] CASTRO-GARCIA S, BLANCO-ROLDAN G L, GIL-RIBES J A. Vibrational and operational parameters in mechanical cone harvesting of stone pine (*Pinus pinea* L.)[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(4): 352 – 358.

[28] 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.

[29] 张诗怡, 唐乐为, 吴明亮, 等. 基于异速生长法则的油茶树主干自然频率经验公式推导及应用[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 32 – 41.
ZHANG Shiyi, TANG Lewei, WU Mingliang, et al. Deduction and application of empirical formula for natural frequency of *Camellia oleifera* trunk based on allometric growth law[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(18): 32 – 41. (in Chinese)

[30] 唐乐为, 张诗怡, 吴明亮, 等. 一种油茶果采收装置及其采收方法: CN118901403B[P]. 2025 – 02 – 07.

[31] SOLA-GUIRADO R, BERNARDI B, GASTRO-GARCIA, et al. Assessment of aerial and underground vibration transmission in mechanically trunk shaken olive trees[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 49(3): 191 – 197.

[32] TANG L, GOUTTEFARDE M, SUN H, et al. Dynamic modelling and vibration suppression of a single-link flexible manipulator manipulator with two cables[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021,162: 104347.

[33] 廖晗, 姜吕锋, 李恒达, 等. 四类变截面悬臂梁在侧向三角形载荷下的挠度[J]. 力学与实践, 2020, 42(5): 594 – 597.
LIAO Han, JIANG Lüfeng, LI Hengda, et al. Deflection of four types of cantilever beams with variable cross section under lateral triangular distributed loads[J]. Mechanics in Engineering, 2020, 42(5): 594 – 597. (in Chinese)