

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第7期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.07.018

论文标题：油茶木粘弹性力学表征与树体动力学分析

作　　者：罗 红，马 帅，张立强，等

收稿日期：2025-09-07

引文格式：罗红,马帅,张立强,等.油茶木粘弹性力学表征与树体动力学分析[J].中南林业科技大学学报,2026,46(7):193-202.

Luo H, Ma S, Zhang L Q, et al. Viscoelastic characterization of *Camellia oleifera* wood and dynamic analysis of whole tree[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):193-202.

相关论文推荐

Recommended articles

轻简移动式油茶果振动采摘装置设计与试验

Design and experiment of light and simple mobile camellia fruit vibration picking device

基于高速摄像技术的油茶果与倒伞型收集装置碰撞恢复系数测定

Research on restitution coefficient of the collision between *Camellia oleifera* fruits and inverted umbrella-type collection devices based on high-speed camera technology

油茶苗自动嫁接成型装置设计与工艺参数优化

Design and processing parameter optimization of automatic grafting machine for oil tea seedling

油茶果采摘机器人采摘头设计与分析

The design and analysis of Camellia fruit picking robots' picking monomers

基于Inventor的油茶果采摘机器人机械臂力学分析

Mechanical arm strength analysis of Camellia fruit picking robot based on inventor

基于Pro/E振动式油茶果采摘机的运动仿真及分析

Movement simulation and analysis of vibratory camellia fruit-harvesting machine based on Pro/E

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.07.018
http: //qks.csuft.edu.cn

油茶木粘弹性力学表征与树体动力学分析

罗 红[a-c]，马 帅[b, c]，张立强[a-d]，谢志杰[b, c]，李立君[a-c]，廖 凯[a-c]，
赵 青[b, c]，李伟嘉[b, c]，肖诗慧[b, c]

（中南林业科技大学 a. 木本油料资源利用全国重点实验室；b. 湖南省林业装备工程技术研究中心；
c. 机械与智能制造学院；d. 长沙市特色经济林生产智能装备技术创新中心，湖南 长沙 410004）

摘 要：【目的】通过木质粘弹性与树体动力学耦合建模，精确获取振动激励下果实及花苞的动态响应并判断其脱落状态，为油茶果振动采收参数设计提供参考依据。【方法】首先，通过压缩蠕变测试获取油茶木试样的蠕变数据，并采用广义 Kelvin-Voigt 模型对蠕变数据进行拟合，以确定油茶木的粘弹性参数。随后，通过压缩蠕变有限元模拟，对粘弹性参数的预测精度进行校验。在此基础上，进一步构建基于粘弹性本构模型的油茶树体有限元模型，开展模态分析与瞬态动力学分析，以获取树体的模态和特征频率，并计算果实与花苞在振动激励下的惯性力响应，最终依据惯性力响应峰值预测二者的脱落率。【结果】1）相较于常规二元、三元模型，广义粘弹性模型能显著提升测试区间内蠕变数据的拟合优度，准确表征油茶木的短期蠕变力学行为（预测精度达 99.92%）；2）在特定激振频率下，侧枝振幅远大于主干振幅，该“侧枝主振”模式可作为激振频率的选取依据；3）当以优选频率 9.428 Hz 进行主干激振（振幅 10 mm，激振高度 400 mm）时，果实脱落率达 93.94%，花苞脱落率仅为 6.06%，满足高效低损采收要求。【结论】本研究揭示了油茶树在特定频率下的“侧枝主振”现象，阐明了振动激励下果实与花苞的惯性力响应差异，建立了基于惯性力峰值的果实和花苞脱落判据。研究结果为油茶果的高效低损振动采收提供了可量化的参数设计依据。

关键词：油茶木；粘弹性；压缩蠕变测试；动力学分析；果实振动采收
中图分类号：S781.23 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)07-0193-10

Viscoelastic characterization of *Camellia oleifera* wood and dynamic analysis of whole tree

Luo Hong[a-c], Ma Shuai[b, c], Zhang Liqiang[a-d], Xie Zhijie[b, c], Li Lijun[a-c], Liao Kai[a-c], Zhao Qing[b, c], Li Weijia[b, c], Xiao Shihui[b, c]

(a. National Key Laboratory of Woody Oil Resources Utilization; b. Engineering Research Center for Forestry Equipment of Hunan Province; c. School of Mechanical and Intelligent Manufacturing; d. Technology Innovation Center for Characteristic Non-wood Forestry Intelligent Equipment of Changsha City, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract:【Objective】To precisely obtain the dynamic responses of fruits and flower buds under vibratory excitation and determine their detachment states through coupled modeling of wood viscoelasticity and tree dynamics, so as to provide reference for the design of vibratory harvesting parameters for *Camellia oleifera* fruits.【Method】Creep data of *C. oleifera* wood samples were first obtained via compression creep tests, and the generalized Kelvin-Voigt model was employed to fit the creep data to determine the viscoelastic parameters of the wood. Subsequently, finite element simulations of compression creep tests were conducted to verify the predictive accuracy of the identified viscoelastic parameters. On this basis, a finite element model of the *C. oleifera* tree was further established based on the viscoelastic constitutive model, and both modal analysis and transient dynamic analysis were performed to obtain the modal shapes and natural frequencies of the tree. The inertial force responses of *C. oleifera* fruits and flower buds under vibratory excitation were then calculated, and finally the detachment rates of the fruits and buds were predicted based on the peak inertial forces.【Result】1) Compared with conventional binary and ternary models, the generalized viscoelastic models can significantly enhance the goodness-of-fit for creep data within the testing duration, which enables accurate characterization of the short-term creep mechanical

收稿日期（Received）：2025-09-07 **修订日期**（Revised）：2025-12-15
基金项目：“十四五”国家重点研发计划项目（2022YFD2202100）；中央财政林业科技推广项目（〔2023〕XT23）。
第一作者：罗红（luohong2017@hnu.edu.cn），副教授，博士，硕士研究生导师。
通信作者：廖凯（liaokai102@csuft.edu.cn），教授，博士，博士研究生导师。
引文格式：罗红 , 马帅 , 张立强 , 等 . 油茶木粘弹性力学表征与树体动力学分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(7):193-202.
Luo H, Ma S, Zhang L Q, et al. Viscoelastic characterization of *Camellia oleifera* wood and dynamic analysis of whole tree[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):193-202.

behavior of *C. oleifera* wood (achieving 99.92% predictive accuracy); 2) At specific excitation frequencies, branch amplitudes far exceed that of the trunk; this “branch-dominated resonance” pattern can serve as a basis for excitation frequency selection; 3) Under trunk excitation at the selected frequency of 9.428 Hz (with a 10 mm amplitude and a 400 mm excitation height), the fruit detachment rate reaches 93.94% and the bud detachment rate remains only 6.06%, meeting the requirements for high-efficiency and low-damage harvesting.【Conclusion】This study reveals the “branch-dominant resonance” phenomenon in the *C. oleifera* tree at specific frequencies, delineates the distinct inertial force responses between fruits and flower buds under vibratory excitation, and establishes detachment criteria based on peak inertial forces. These findings provide a quantifiable parametric design guideline for the efficient and low-damage vibratory harvesting of *C. oleifera* fruits.

Keywords: *Camellia oleifera* wood; viscoelasticity; compression creep test; dynamic analysis; vibratory fruit harvesting

油茶是我国特有的木本油料作物，具有重要的经济与生态价值 [1-2]。目前我国油茶种植面积已超过 46 000 km^2，但采收环节仍以人工为主 [3-4]。油茶果采收已成为油茶产业发展最薄弱的环节 [5]。如何实现油茶果的高效采收，是油茶生产技术领域的重要关注点。

振动采收技术因其高效性和广适性，已成为现代林果采收的主流方法。其核心机理在于通过激振参数与树体特性的精准匹配，实现果实群体性振动与惯性脱落 [6-8]。例如，Láng[9] 通过构建果树采摘动力学模型，揭示了激振频率与激振位置对果实分离行为的调控机制；Castro-García 等 [10] 通过模态试验获取了橄榄树 *Olea europaea* 的固有频率与阻尼特性，为橄榄振动采收提供了理论指导；Polat 等 [11] 在不同激振频率和振幅下开展了开心果 *Pistacia vera* 的采摘试验，发现 20 Hz 激振频率与 50 mm 振幅组合可实现 95.5% 的采收率。这些成果为林果振动采收理论体系奠定了重要基础。

然而，油茶果机械化采收面临独特技术挑战：一方面受限于丘陵山地复杂地形条件 [12]，另一方面受制于油茶“花果同期”的生物学特性 [13]。该难题已被中国林学会列为 10 大林草工程技术难题之一。针对上述挑战，中南林业科技大学研发了系列化自走式振动采收机 [14-16]，补齐了国内油茶机械化采收领域的装备短板。便携式采收设备的相继研发，为复杂地形下油茶果采收提供了互补方案 [17-19]。为进一步优化采收效果，研究者通过有限元模态分析、试验模态分析和神经网络模型 [20-22]，对油茶树干、枝的模态特征和动态特性进行了辨识和预测，并对激振频率、振幅、作用点位等关键作业参数进行了优化。但需指出，现阶段树体动力学研究普遍基于弹性体假设，忽视了木质材料本身的粘弹性（流变）特性（如蠕变、松弛、阻尼耗散等）。这些特性直接影响树体的振动能量传递效率和动态响应特性 [23-24]，进而影响果实的实际采收效果。因此，构建高精度的油茶木粘弹性本构模型，是预测树体动态响应特性、优化振动采收参数的先决条件。然而，相较于杨木 *Populus* spp.、桉木 *Eucalyptus* spp. 等速生材的成熟的粘弹性研究体系 [25]，目前关于油茶立木粘弹性力学与动力学特性的研究较少。

鉴于此，本研究开展油茶木的粘弹性表征及油茶树体的动力学分析。首先，通过压缩蠕变测试与计算拟合，构建油茶木的粘弹性本构模型；然后，开展油茶木压缩蠕变数值模拟，评估粘弹性模型的准确性；最后，开展油茶树体动力学分析，建立果实和花苞惯性脱落的动力学判据，为实现油茶果高效低损采收提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 测试材料

材料来源于湖南省长沙市浏阳市油茶种植基地（28°00′22″N，113°19′46″E）。基地属亚热带季风湿润气候，地处浏阳河流域。油茶木样本取自成熟油茶树（10 年生）的主干部分。根据国家标准 GB/T 1927.11—2022[26]，将样本加工成横截面为 20 mm×20 mm、高度为 30 mm 的长方体试样，其高度方向为顺纹方向。油茶木试样的平均湿基含水率为 55.11%，平均密度（ρ）为 1.03 g/cm^3，纵向初始杨氏模量（E_{int}）为 13.03 GPa，泊松比（υ）为 0.40[27]。

1.2 压缩蠕变测试

采用精密电伺服加载系统开展油茶木压缩蠕变测试，测试过程如图 1 所示。该系统可实现压力、位移和速度的精确闭环控制，并自动记录位移和压力数据 [28]。为减少测试误差，采用 3 个同等规格的试样开展独立重复测试。为减少试样端面微观不平整度带来的影响，先以 10 N 小压力预压试样，再以 2 000 N 压力对试样进行恒力加载。为降

低初始间隙和设备形变的干扰，本研究取压力稳定至 2 000 N 后的位移数据开展粘弹性参数计算。为减少界面摩擦对试样压缩变形的影响，在上下接触面喷涂 ST-whgy001 雾化硅油进行润滑，获得较低的界面摩擦系数（μ=0.097）[29]。所有测试均在室温（25 ℃左右）和相对稳定的湿度（73% 左右）下进行，以控制环境变量。

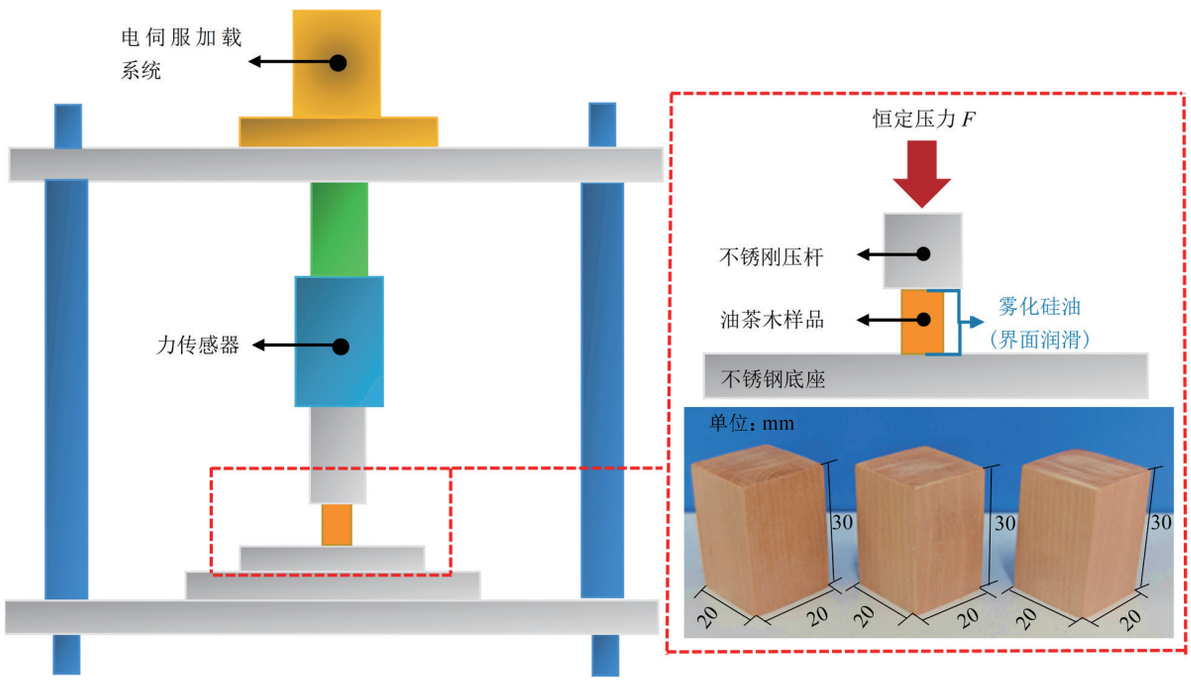


图 1　油茶木压缩蠕变测试示意

Fig. 1　Compression creep testing of *C. oleifera* wood sample

1.3　粘弹性参数计算

根据线性粘弹性理论，油茶木试样在单轴压缩过程中应力 - 应变本构关系可用如下遗传积分描述 [29]：

$$\varepsilon(t)=\int_0^t J(t-\xi)\frac{\mathrm{d}\sigma(\xi)}{\mathrm{d}\xi}\mathrm{d}\xi+J(t)\sigma(0)\text{。}\qquad(1)$$

$$\sigma(t)=\int_0^t E(t-\xi)\frac{\mathrm{d}\varepsilon(\xi)}{\mathrm{d}\xi}\mathrm{d}\xi+E(t)\varepsilon(0)\text{。}\qquad(2)$$

式中：t 和 ξ 分别为当前时间和过去时间；$E(t)$ 和 $J(t)$ 分别为随时间 t 衰减的杨氏松弛模量和柔量；$E(t-\xi)$ 代表 $(t-\xi)$ 时刻的杨氏松弛模量，$J(t-\xi)$ 代表 $(t-\xi)$ 时刻的柔量；$\sigma(0)$ 代表初始应力；$\varepsilon(t)$ 和 $\sigma(t)$ 分别为试样的真实应变和真实应力，定义为：

$$\varepsilon(t)=-\ln[1-u(t)/h]\text{。}\qquad(3)$$

$$\sigma(t)=\frac{F}{A(t)}=\frac{F}{abh/[h-u(t)]}\text{。}\qquad(4)$$

式中：a 和 b 分别为试样横截面的初始长度和初始宽度；h 为试样的初始高度；$A(t)$ 为试样的实时承载面积；$u(t)$ 为试样的实时压缩量。

对公式（1）进行时域离散化处理，得到离散柔量 J_n 的有限差分表达式：

$$J_n=\frac{\varepsilon_n}{\sigma_0}-\frac{1}{\sigma_0}\sum_{k=1}^{n}J_{n-k}\left(\frac{\sigma_k-\sigma_{k-1}}{\Delta t}\right)\Delta t\text{。}\qquad(5)$$

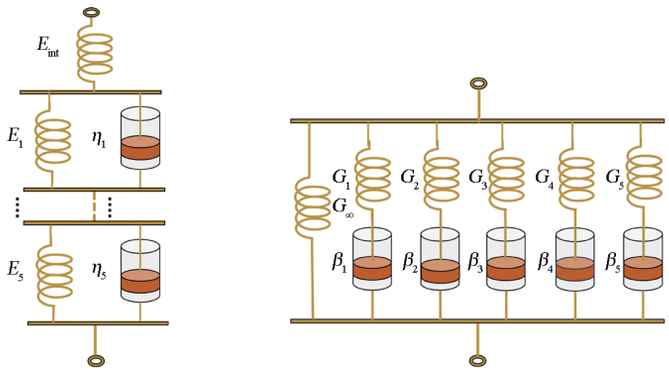
式中：ε_n 和 σ_k 分别为真实应变和真实应力的离散数据；σ_0 为零时刻的应力，即 σ_0=$\sigma(0)$；n 为广义 Kelvin-Voigt 模型中串联的 Kelvin 单元的个数；k 为 Kelvin 单元的序号；Δt 为时间间隔。

常规二元粘弹性模型（Maxwell 模型、Kelvin-Voigt 模型）与三元 Burgers 粘弹性模型存在拟合精度不足的局限 [30]。因此，本研究另选用具有 5 个弹簧 - 黏壶单元的广义 Kelvin-Voigt 模型（图 2a）对 J_n 进行最小二乘法拟合，拟合软件为 1stOpt。同时，将常规 Maxwell 模型、Kelvin 模型及 Burgers 模型设为对照组，分别对同一组数据进行拟合。通过拟合，获得时域连续柔量 [$J(t)$]，其表达式如下：

$$J(t)=\frac{1}{E_{\mathrm{int}}}+\sum_{n=1}^{5}\frac{1}{E_i}(1-\mathrm{e}^{-tE_i/\eta_i})\text{。}\qquad(6)$$

式中：E_{int} 为初始杨氏模量，可由悬臂梁激振测试确定；E_i 和 η_i 均为待拟合参数，分别对应第 i 个单元的杨氏模量和粘度；e 为自然常数。

引入复变量 s，对公式（6）进行拉氏变换，



（a）广义Kelvin-Voigt模型 Generalized Kelvin-Voigt model　　（b）广义Maxwell模型 Generalized Maxwell model

图 2 具有多个弹簧 - 阻尼单元的广义粘弹性模型
Fig. 2 Generalized viscoelastic models with multiple spring-dashpot elements

得到拉氏域的柔量为：

$$\overline{J}(s)=\frac{1}{sE_{\text{int}}}+\sum_{i=1}^{5}\frac{1}{s(1+s\eta_i/E_i)E_i}。\quad（7）$$

根据公式（1）（2）和（7），推导出拉氏域的杨氏松弛模量为：

$$\overline{E}(s)=\frac{1}{s^2\overline{J}(s)}=\left[\frac{s}{E_{\text{int}}}+\sum_{i=1}^{5}\frac{s}{(1+s\eta_i/E_i)E_i}\right]^{-1}。\quad（8）$$

由此可得拉式域的剪切松弛模量：

$$\overline{G}(s)=\frac{\overline{E}(s)}{2(1+v)}。\quad（9）$$

对公式（9）进行逆拉氏变换，可得到时域剪切松弛模量 $G(t)$。该表达式通常为非解析形式，难以直接输入到通用有限元软件（如 MSC.Marc）。为便于后续有限元分析，可利用广义 Maxwell 模型（图 2b）将 $G(t)$ 转化为初等 Prony 级数形式：

$$G(t)=G_\infty+\sum_{i=1}^{5}G_i\mathrm{e}^{-t/\tau_i}。\quad（10）$$

式中：G_∞为长期剪切模量；$\tau_i=\beta_i/G_i$，为剪切时间分量，即剪切粘度分量（β_i）与剪切模量分量（G_i）之比。

1.4 压缩蠕变有限元模拟

为评估所获得的粘弹性参数的准确性，本研究利用 MSC.Marc 软件对油茶木压缩蠕变过程进行有限元模拟。其中，油茶木试样设置为粘弹性体，2520 不锈钢压杆和底座均设置为弹性体（其密度、泊松比和杨氏模量分别为 7.9 g/cm^3、0.30 和 193 GPa[29]）。所有实体均采用六面体网格划分。其中，变形较小的压杆和底座采用较粗的网格划分（网格尺寸为 0.8 mm），以提高仿真计算效率；变形较大的木材试样采用细化网格处理（网格尺寸为 0.2 mm），以提高蠕变位移计算精度。根据压缩蠕变测试中的真实负载和润滑条件，在仿真中对压杆施加 2 000 N 恒定压力，并在上下接触面设定实测的摩擦系数（μ=0.097[29]）。

1.5 有限元模态分析

为精确获取油茶树的谐振特性，本研究采用所测得的粘弹性参数进行树体有限元模态分析。通过实地测量获取目标树体的主要几何尺寸，利用 Solidworks 软件的扫描混合功能对主干和侧枝进行三维建模，构建树体几何实体模型。将建好的几何实体模型导入 MSC.Marc 软件，采用自适应四面体网格对模型进行离散化处理。对离散化处理后的模型赋予粘弹性参数，并在树干底部施加固定约束，进而开展有限元模态分析。采用 Lanczos 算法，自动提取树体在 0 ～ 20 Hz 频段内的全部模态。根据各模态下树体的位移分布，筛选出大部分侧枝振幅明显高于主干振幅的“侧枝主振”模态，并将其对应的特征频率作为后续有限元瞬态动力学分析的激振频率。

1.6 有限元瞬态动力学分析

为分析油茶树 - 果 - 花多体系统的动态响应特性，在油茶树体模型上装配了 33 个带果柄的果实和 33 个带花梗的花苞。其中，果实、果柄、花苞、花梗的尺寸根据现场实测确定。将包含果实、果柄、花苞、花梗的油茶树三维实体模型导入 MSC.Marc 软件，采用自适应四面体网格对模型进行离散化处理。为模拟振动采收工况，对树底部进行固定并在主干施加正弦位移激励，激振频率采用有限元模态分析所得的特征频率。参考前期研究结果[16]，

设定激振振幅 10 mm、激振高度 400 mm、激振持续时间 5 s，开展有限元瞬态动力学分析。基于此，提取各接触体间的相互作用力，得到激振工况下所有果实和花苞的实时惯性力，进而建立惯性脱落判据：当果实或花苞的惯性力峰值大于自身临界结合力时，判定其达到脱落条件；反之，则判定未达到脱落条件。

2　结果与分析

2.1　蠕变位移分析

图 3 为试样在 2 000 N 恒定压力下的蠕变位移响应。试样的蠕变位移表现出良好的一致性，验证了测试结果的可靠性。同时发现，在 2 000 N 恒定压力下，试样的蠕变位移在测试区间内呈现明显的时间依赖性：初期应变快速增加形成主蠕变阶段，随后进入增速递减的稳态蠕变阶段；整个测试区间内未出现加速蠕变的破坏迹象。这种时间依赖性变形特征与天然木的蠕变曲线一致 [30]，证明了油茶木具有明显的粘弹性特性。

2.2　粘弹性参数拟合结果

采用 Burgers 模型、Maxwell 模型、Kelvin 模型和广义 Kelvin-Voigt 模型分别对油茶木的离散柔量（J_n）进行拟合，拟合曲线如图 4 所示，拟合优度指标如表 1 所示。与 Burgers、Maxwell、Kelvin 等常规模型相比，广义 Kelvin-Voigt 模型在测试区间内对柔量数据表现出更高的拟合优度，其相关系数（r）达 0.993，决定系数（R^2）为 0.984，均方根误差为 4.091×10^{-12} Pa^{-1}。该拟合结果表明，在测试区间内，广义 Kelvin-Voigt 能更准确地表征油茶木的短期粘弹性蠕变特性。

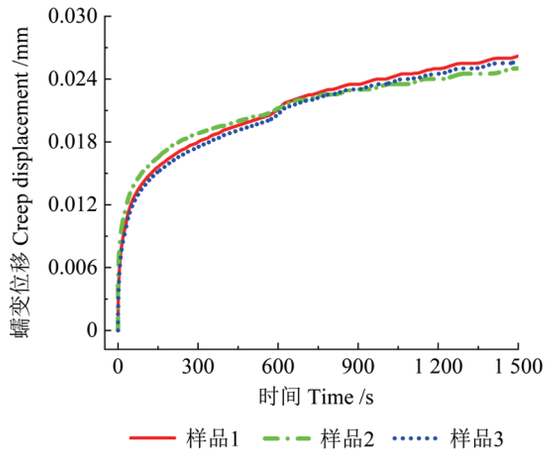


图 3　油茶木的蠕变位移响应曲线

Fig. 3　Creep displacement responses of *C. oleifera* wood samples

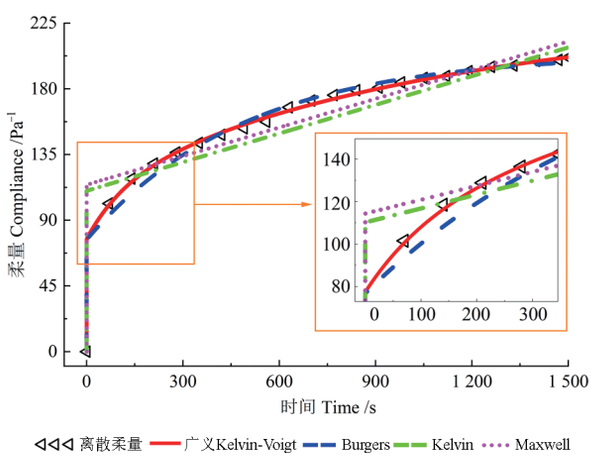


图 4　原始柔量数据及其拟合曲线

Fig. 4　Raw compliance data and their fitted curve

表 1　不同粘弹性模型对柔量数据的拟合优度

Table 1　Goodness of fit of different viscoelastic models to compliance data

拟合模型 Fitting model	相关系数 Correlation coefficient（r）	决定系数 Determination coefficient（R^2）	均方根误差 Root mean square error /Pa^{-1}
广义 Kelvin-Voigt Generalized Kelvin-Voigt	0.993	0.984	4.091×10^{-12}
Burgers	0.887	0.973	5.355×10^{-12}
Kelvin	0.514	0.742	1.646×10^{-11}
Maxwell	0.732	0.869	1.172×10^{-11}

广义 Maxwell 模型拟合得到的时域剪切松弛模量 [$G(t)$] 和粘弹性参数分别见图 5 和表 2。由图 5 可知，$G(t)$ 随时间呈明显的衰减趋势，与弹性体有着显著区别。从结构力学角度分析，剪切模量衰减现象表明，油茶木在变形过程中刚度不断下降，表现出不同于弹性体的非线性力学响应。由表 2 可知，不同 Maxwell 单元的 G_i 和 τ_i 呈现数量级上的显著差异（最大相差近 3 个数量级），表明广义 Maxwell 模型能够有效表征材料在宽域松弛时间谱上的粘弹性行为。

2.3　压缩蠕变有限元模拟结果

图 6a 为油茶木在 MSC.Marc 软件中构建的压缩蠕变三维有限元模型。通过瞬态结构分析，得

到试样压缩后的轴向（Z 轴方向）位移分布如图 6b 所示。试样的轴向位移沿高度方向呈现明显梯度，顶部位移绝对值最大，底部趋近于零，与加载条件相符。

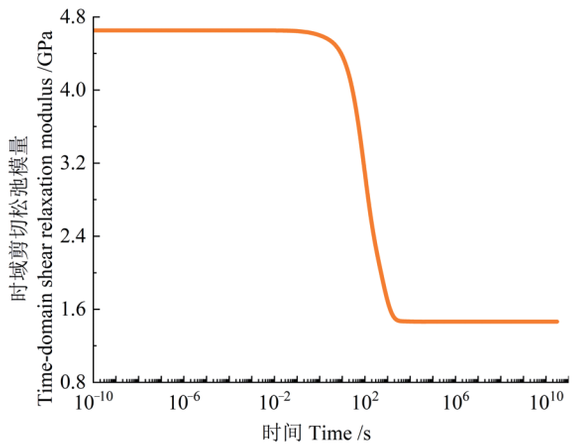


图 5 时域剪切松弛模量曲线
Fig. 5 Shear relaxation modulus curve

表 2 拟合得到的油茶木的粘弹性参数
Table 2 Fitted viscoelastic parameters of *C. oleifera* wood

单元编号 Unit No.（i）	G_i /MPa	τ_i /s
1	1 733.906	73.390
2	22.272	0.211
3	95.287	128.631
4	1 334.528	549.456
5	0.372	0.292

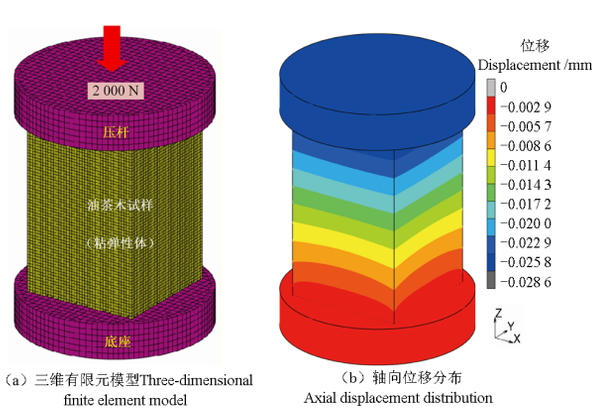


图 6 油茶木压缩蠕变数值模拟
Fig. 6 Numerical simulation of compression creep of *C. oleifera* wood

根据有限元分析结果，油茶木的预测蠕变位移如图 7 所示。可以发现，油茶木蠕变位移的预测值与实测值呈现出理想的一致性，预测精度达 99.92%，验证了所测得的粘弹性参数的准确性。二者之间仍存在 0.08% 的偏差，其主要原因在于：在采用雾化硅油润滑的压缩蠕变测试中，摩擦扰动仍未能完全消除，导致油茶木松弛模量和等效刚度的计算值偏高，造成仿真的蠕变位移偏低。这种摩擦扰动在松木 *Pinus sylvestris* 压缩测试中也得到了充分证实 [31-32]。因此，为构建更高精度的木材粘弹性模型，后续研究可考虑在压缩蠕变测试中引入二硫化钨等超润滑界面层。

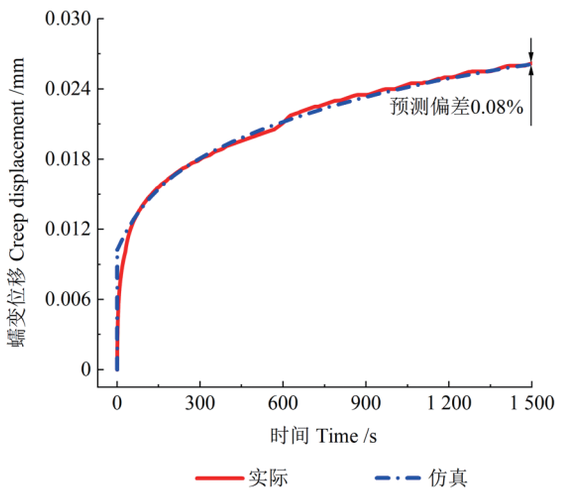


图 7 油茶木的预测和实测蠕变位移对比
Fig. 7 Comparison between predicted and measured creep displacements of *C. oleifera* wood

2.4 树体有限元模态分析结果

图 8a 为根据现场实测构建的油茶树简化模型，其株高 2 026.8 mm，主干高 1 100.6 mm，主干直径 78.2 mm。图 8b ～ f 为油茶树的前 6 阶模态。可以观察到，在第 1、4、5 阶模态中，油茶树仅有少数侧枝振动明显，大部分侧枝振动较小；而在第 2、3 阶模态中，绝大部分侧枝出现大幅振动；尤其是在第 2 阶模态，侧枝末端的振幅明显高于主干。该结果表明，当激振频率匹配树体的第 2 阶特征频率（9.428 Hz）时，在主干施加较小激励即可激发侧枝的大幅振动。在该“侧枝主振”模式下，侧枝的能量汇聚程度显著提升，有助于提升振动能量定向传递效率，实现油茶果高效振动采收。因此，可选用 9.428 Hz 作为油茶果振动采收的优选激振频率。

2.5 树体有限元瞬态动力学分析结果

本试验共设置的 33 个样本，单个器官掉落事件会对脱落率造成约 3% 的波动，样本规模可较为全面地反映果实和花苞的整体掉落情况。为便于分析，果实设定为球体，花苞设定为椭球体。基于实地测量并参考文献[33]，确定果实、花苞、果柄、花梗的关键材料属性和几何参数如表 3 所示。

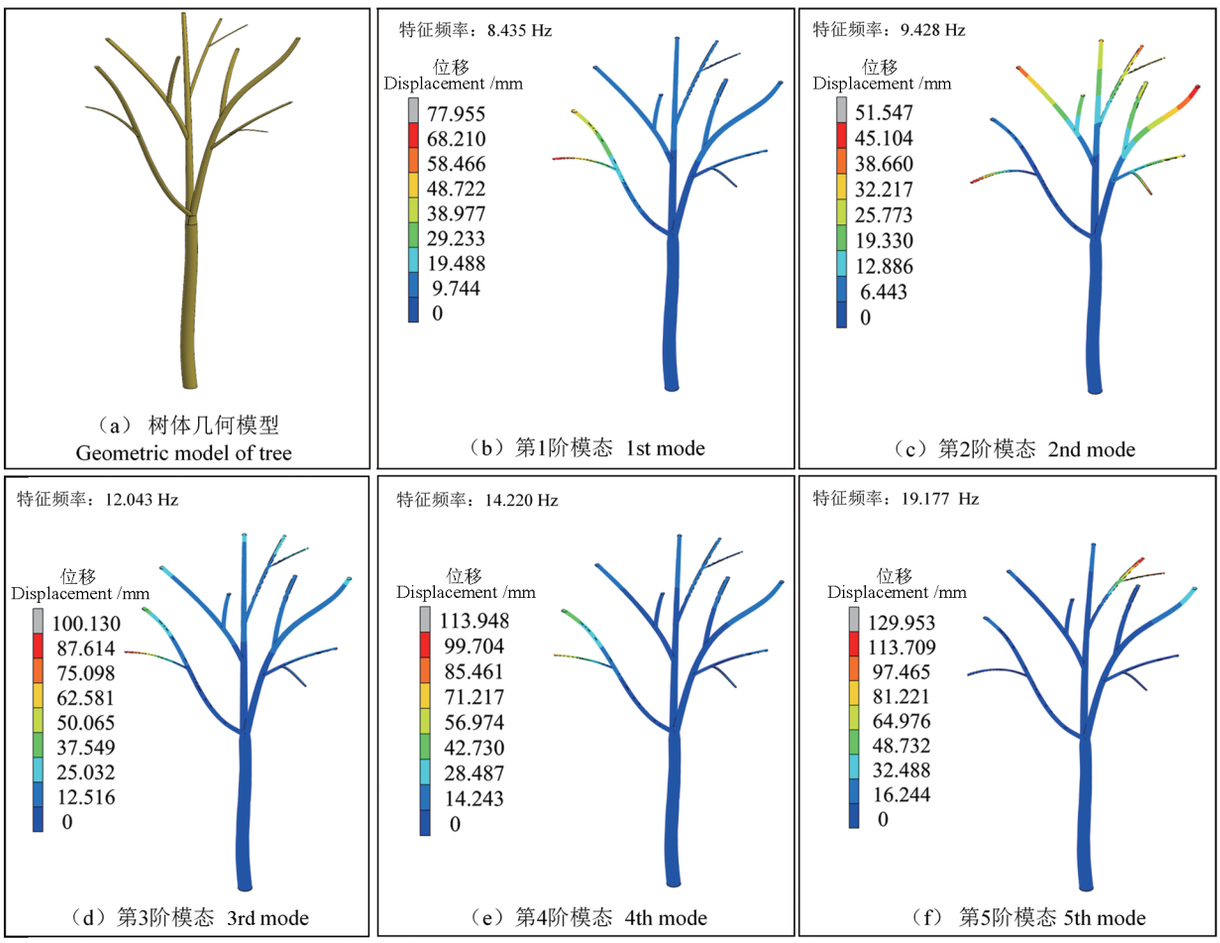


图 8　油茶树模态分析
Fig. 8　Modal analysis of *C. oleifera* tree

表 3　用于瞬态分析的材料属性和几何参数
Table 3　Material properties and geometric parameters used in transient dynamics analysis

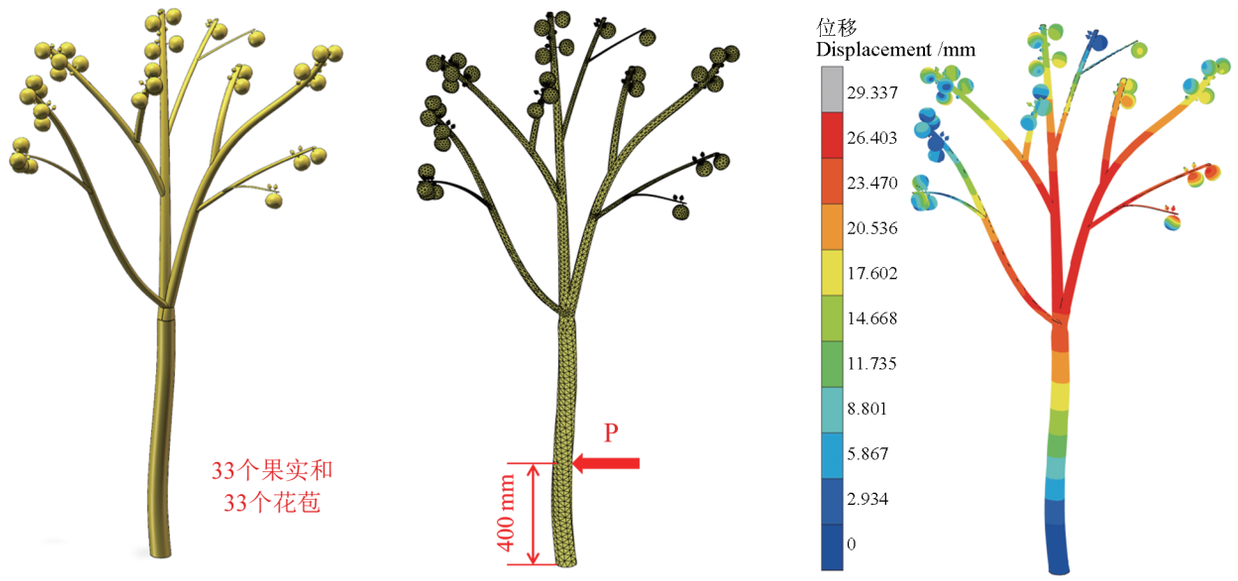
样本 Sample	密度 Density / (g·mm^{-3})	杨氏模量 Young's modulus / MPa	泊松比 Poisson's ratio	平均直径 Average diameter /mm
果实 Fruit	0.954	4.984	0.35	45.53
花苞 Bud	0.882	2.942	0.40	15.36（长径），11.21（短径）
果柄 Stem	1.345	3 000	0.17	5.18
花梗 Pedicel	0.616	10	0.35	2.09

图 9a 为所构建的包含果实和花苞的油茶树三维实体模型。图 9b 为自适应四面体网格离散处理后的油茶树有限元模型，其中主干 P 处为外部激励施加位置。图 9c 为瞬态动力学分析得到的油茶树的全局位移分布。由图 9 可以发现，在优选的激振频率（9.428 Hz）下，各侧枝的位移响应整体高于主干，与模态分析结果一致。图 10 为该激振条件下油茶果实和花苞产生的实时惯性力。显然，不同侧枝上的果实和花苞的惯性力存在差异，该差异可能与侧枝的空间分布差异和枝干刚度差异相关。同时发现，果实的惯性力峰值整体高于花苞，该差异可能与二者的质量差异相关。

闫锋欣等 [18] 研究指出，油茶果实的临界结合力为 16.22 N，花苞的临界结合力为 10.24 N。由图 10 可统计出，有 31 个油茶果的惯性力峰值大于 16.22 N，有 31 个花苞的惯性力小于 10.24 N。根据惯性脱落原理 [6]，当惯性力超过临界生物结合力时，果实、花苞将会从树体脱落。基于该动力学判据，通过统计惯性力峰值，得出果实的脱落数为 31 个，对应的脱落率为 93.94%；花苞的脱落数为 2 个，对应的脱落率为 6.06%（图 11）。该结果表明，当前激振参数组合能实现较高的果实脱落率与较低的花苞损伤率，基本满足油茶“花果同期”生物特性对果实采收时兼顾花苞保护的要求。当然，为实现“落果保花”精准采收（果实采净率不小于 95%，花苞损伤率不大于 3%），后续研究仍需结合惯性力峰值对激振频率、振幅、激振高度等作业参数进行协同优化。

3　讨　论

本研究首次将木质材料的粘弹性力学本构引入油茶树整体动力学分析，通过计算激振条件下



（a）三维模型　Three-dimensional model　（b）有限元模型　Finite element model　（c）全局位移分布　Total displacement distribution

图 9　油茶树瞬态动力学分析

Fig. 9　Transient dynamics analysis of *C. oleifera* tree

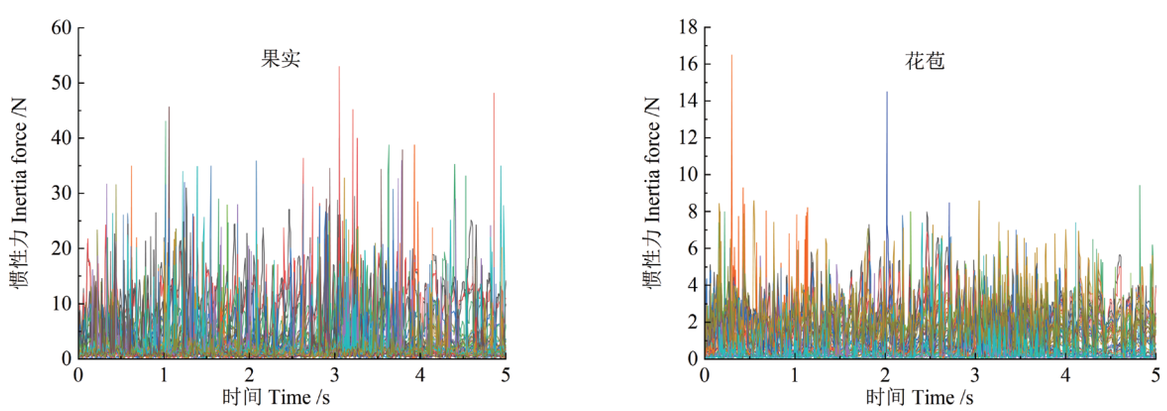


图 10　油茶果实和花苞的实时惯性力

Fig. 10　Real-time inertia forces of *C. oleifera* fruits and buds

果实和花苞的惯性力峰值，建立其粘附与脱落行为的动力学判断依据。该方法可精确获取振动载荷下树 - 果 - 花多体系统的动态响应特性，预测果实和花苞的脱落率，为林果振动采收参数优化提供量化依据。基于本研究的方法与结果，现将研究的创新点与局限性总结如下。

3.1　油茶木粘弹性表征

针对压缩蠕变测试中界面摩擦扰动导致的精度下降问题 [29]，本研究通过喷涂雾化硅油，显著降低界面摩擦（$\mu < 0.1$），构建了高精度的粘弹性模型（短期蠕变位移的预测精度达 99.92%）。但应指出，该模型主要针对瞬态激振采收工况，其对长期力学行为的预测精度需进一步验证。此外，由于振动能量主要沿树高方向（纵向）传播 [34]，

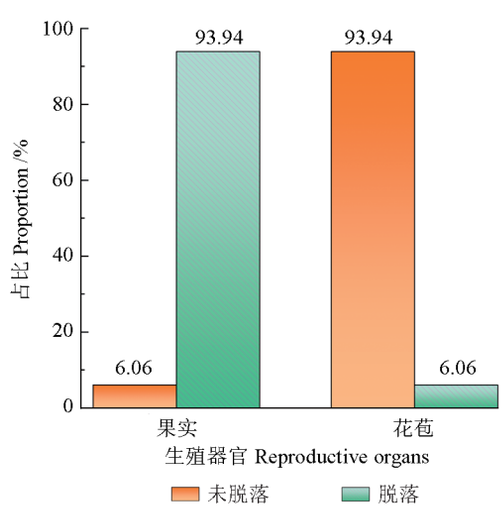


图 11　油茶果实和花苞的脱落分析

Fig. 11　Drop analysis of *C. oleifera* fruits and buds

本研究聚焦于顺纹试样的粘弹性表征，未考虑纤维取向的影响。后续研究将通过正交蠕变测试，构建不同方向的油茶木粘弹性本构模型。

3.2　油茶树动力学分析

针对现有模型忽略树体粘弹性及果实、花苞导致的动力学预测失准问题 [14]，本研究建立了树 - 果 - 花系统的三维实体模型（图 9a），并为树体赋予了粘弹性参数（表 2）。该模型可精准计算多体系统的非线性动力学响应，直接获取果实和花苞的惯性力峰值。基于惯性力峰值建立的惯性脱落判据，相较于传统的加速度型脱落判据 [21] 更为便捷可靠。但应指出，本研究尚未系统考虑品种、地域等因素对树体动力学特性及果实、花苞生物结合力的影响。后续研究将结合三维激光扫描技术和林地试验，构建融合样本多样性的生物力学参数库与树形特征库，以提升不同采收作业工况下树 - 果 - 花系统的动态响应预测精度。

4　结　论

本研究通过压缩蠕变测试，构建了高精度的油茶木粘弹性本构模型；基于粘弹性树体动力学分析，建立了果实与花苞脱落的动力学判断依据。主要结论如下：

1）相较于常规二元、三元模型，广义粘弹性模型能显著提升测试区间内蠕变数据的拟合优度（r=0.993，R^2=0.984，均方根误差为 4.091×10^{-12} Pa^{-1}），准确表征油茶木的短期时变力学特性预测（精度达 99.92%），为树体动力学分析提供了高精度的粘弹性材料参数。

2）在特定激振频率下，油茶树出现“侧枝主振”模式，侧枝振幅远大于主干振幅；此时振动能量定向传递效率显著提升，有助于实现油茶果的高效振动采收。

3）在优选激振频率（9.428 Hz）下，当振幅为 10 mm、激振高度为 400 mm 时，油茶果脱落率达 93.94%，花苞脱落率为 6.06%，满足高效低损采收作业要求。

参考文献：

[1] Gao L, Jin L H, Liu Q N, et al. Recent advances in the extraction, composition analysis and bioactivity of *Camellia* (*Camellia oleifera* Abel.) oil[J]. Trends in Food Science & Technology,2024,143:104211.

[2] 李子昱 , 侯思璐 , 周必成 , 等 . ‘ 德油 6 号 ’ 油茶带芽茎段快繁体系的建立 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(7):130-139.
Li Z Y, Hou S L, Zhou B C, et al. Tissue culture through the stem segment with buds of ‘Deyou No. 6’ *Camellia oleifera*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024,44(7):130-139.

[3] 陈吉朋 , 王凯 , 陈佳佳 , 等 . 双轨式油茶果采摘机器人的动力轨道平台设计 [J]. 林业工程学报 ,2025,10(2):138-146.
Chen J P, Wang K, Chen J J, et al. Design of a dual track power platform of *Camellia oleifera* fruit picking robot[J]. Journal of Forestry Engineering,2025,10(2):138-146.

[4] 陈永忠 . 我国油茶科技进展与未来核心技术 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(7):1-22.
Chen Y Z. Scientific and technological progress and future core technologies of oil tea *Camellia* in China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(7):1-22.

[5] 汤晶宇 , 范志远 , 向文博 , 等 . 油茶果采收技术装备研究现状与趋势 [J]. 林业工程学报 ,2025,10(5):25-38.
Tang J Y, Fan Z Y, Xiang W B, et al. Research status and trend of *Camellia oleifera* fruit harvesting technology and equipment[J]. Journal of Forestry Engineering,2025,10(5):25-38.

[6] 伍德林 , 赵恩龙 , 姜山 , 等 . 基于双摆模型的油茶果冠层振动参数优化与试验 [J]. 农业机械学报 ,2021,52(12):96-104.
Wu D L, Zhao E L, Jiang S, et al. Optimization analysis and test of canopy vibration parameters of *Camellia* fruit based on double pendulum model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(12):96-104.

[7] 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 S Y, Tang L W, Wu M L, et al. Empirical formula for the natural frequency of *Camellia oleifera* trunk using allometric growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2024,40(18):32-41.

[8] Wang F Y, Zhao J, Liu Y C, et al. Motion trajectory of different fruiting types of *Camellia oleifera* fruit under vibration: theoretical and experimental studies[J]. Industrial Crops and Products,2025,231:121173.

[9] Láng Z. Dynamic modelling structure of a fruit tree for inertial shaker system design[J]. Biosystems Engineering,2006,93(1): 35-44.

[10] 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,2008,22:795-802.

[11] Polat R, Gezer I, Guner M, et al. Mechanical harvesting of pistachio nuts[J]. Journal of Food Engineering,2007,79:1131-1135.

[12] 曹靖宜 , 廖凯 , 高自成 , 等 . 油茶果采收机行驶性能研究 [J]. 中国工程机械学报 ,2024,22(6):836-840.
Cao J Y, Liao K, Gao Z C, et al. Research on the driving performance of *Camellia oil* harvester[J]. Chinese Journal of Construction Machinery,2024,22(6):836-840.

[13] Du X Q, Shen T F, Chen K Z, et al. Simulation study and

field experiments on the optimal canopy shaking action for harvesting *Camellia oleifera* fruits[J]. Journal of Agricultural Engineering,2022,53:1245.

[14] 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 Z C, Zhao K J, Li L J, et al. Design and experiment of suspended vibratory actuator for picking *Camellia oleifera* fruits[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(21):9-17.

[15] 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 Z C, Li L J, Li X, et al. Development and test of picking actor in oil-tea *Camellia* fruit picking machine of tooth comb type[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(10):19-25.

[16] 彭语轩 , 廖凯 , 徐诗宇 , 等 . 丘陵山区轮式油茶果采收一体机研制 [J]. 农业工程学报 ,2024,40(22):31-38.
Peng Y X, Liao K, Xu S Y, et al. Development of a wheeled integrated machine for *Camellia oleifera* fruit harvesting in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2024,40(22):31-38.

[17] 涂恒铭 , 饶洪辉 , 李涛 , 等 . 轻简式油茶侧枝夹持振动采摘装置研究 [J]. 中国农机化学报 ,2024,45(10):33-38.
Tu H M, Rao H H, Li T, et al. Research on vibration picking device for light and simple *Camellia oleifera* lateral branches[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2024,45(10):33-38.

[18] 闫锋欣 , 李许杰 , 杨永霞 , 等 . 手持冲击梳刷式油茶果采摘装置设计与试验 [J]. 农业机械学报 ,2023,54(12):129-140.
Yan F X, Li X J, Yang Y X, et al. Design and experiment of hand-held impacting comb-type *Camellia oleifera* fruit harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(12):129-140.

[19] 寇欣 , 王东 , 周建波 , 等 . 国内林果采摘设备研究现状分析 [J]. 林业机械与木工设备 ,2022,50(6):15-21.
Kou X, Wang D, Zhou J B, et al. Analysis of the research status of domestic forest fruit picking equipment[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment,2022,50(6):15-21.

[20] Wang R Y, Fang D, Wu C, et al. Dynamic response of *Camellia oleifera* fruit-branch based on mathematical model and high-speed photography[J]. Biosystems Engineering,2024,237:232-241.

[21] Wu D L, Zhao E L, Fang D, et al. Determination of vibration picking parameters of *Camellia oleifera* fruit based on acceleration and strain response of branches[J]. Agriculture, 2022,12:1222.

[22] Du X Q, Han X T, Shen T F, et al. Natural frequency identification model based on BP neural network for *Camellia oleifera* fruit harvesting[J]. Biosystems Engineering,2024,237:38-49.

[23] Brémaud I, Ei Kaïm Y, Guibal D, et al. Characterisation and categorisation of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types[J]. Annals of Forest Science, 2012,69:373-386.

[24] Grande E, Franceschini R. Calibration of mass-spring-damper equivalent systems for real time assessment of the dynamics of trees[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024,227:109610.

[25] Pot G, Toussaint E, Coutand C, et al. Experimental study of the viscoelastic properties of green poplar wood during maturation[J]. Journal of Materials Science,2013,48:6065-6073.

[26] GB/T 1927.11—2022 无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第 11 部分 : 顺纹抗压强度测定 [S].
GB/T 1927.11—2022 Test methods for physical and mechanical properties of small clear wood specimens: part 11: determination of ultimate stress in compression parallel to grain[S].

[27] Zhang Y Y, Yin S H, Liang R G, et al. New testing and calculation method for determination viscoelasticity of optical glass[J]. Optics Express,2020,28(1):626-640.

[28] Yu J W, Luo H, Zhang Y Y, et al. A comprehensive study on frictional dependence and predictive accuracy of viscoelastic model for optical glass using compression creep test[J]. Journal of the American Ceramic Society,2019,102(11):6606-6617.

[29] Luo H, Xie Z J, Li L J, et al. Critical role of reducing interfacial friction in compressive creep characterisation of pinewood[J]. Wood Science and Technology,2025,59:32.

[30] Navi P, Stanzl-Tschegg S. Micromechanics of creep and relaxation of wood. a review[J]. Holzforschung,2009,63:186-195.

[31] Huč S, Hozjan T, Svensson S. Rheological behavior of wood in stress relaxation under compression[J]. Wood Science and Technology,2018,52:793-808.

[32] Xavier J, De Jesus A M P, Morais J J L, et al. Stereovision measurements on evaluating the modulus of elasticity of wood by compression tests parallel to the grain[J]. Construction and Building Materials,2012,26:207-215.

[33] 李庆松 , 康丽春 , 饶洪辉 , 等 . 油茶果分层采摘机构花苞损伤有限元分析及试验 [J]. 农机化研究 ,2024,46(3):34-41.
Li Q S, Kang L C, Rao H H, et al. Finite element analysis and experiment on *Camellia* bud damage for *Camellia* fruit with layered picking mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,46(3):34-41.

[34] 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 D L, Zhao E L, Jiang S, 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.

[本文编校：张雨朦]