doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.09.022

基于结构声强法的红枣树振动能量传递特性研究

魏　娟[1,2]　王子康[1]　马廷军[3]　王川伟[1,2]　马　逾[1]　武导侠[1]

(1.西安科技大学机械工程学院,西安 710054;2.陕西省矿山机电装备智能检测与控制重点实验室,西安 710054;
3.佳县林木种苗工作站,榆林 719200)

摘要:为了研究红枣振动采收过程中能量在枣树中的传递特性及规律,提出了基于结构声强法的振动能量在枣树中传递的可视化分析方法,构建了红枣树结构声强矢量场分析模型,求解并可视化了不同激振条件下红枣树的结构声强矢量场。通过振动能量通量比量化分析表明:在低频率振动(1 阶、2 阶固有频率)时,能量主要滞留在主干,随着频率升高(3 阶、4 阶固有频率),能量均匀地传递至红枣树各结构部位;在圆周激励或直线激励下,能量主要滞留在主干,而在非圆周激励或三维激励下,能量均匀地传递至红枣树各结构部位;随着激振时间增加,能量传递路径逐渐变化,但到 3 s 后,传递路径趋于稳定;能量传递效果与激振高度呈正相关;激振力的变化不影响能量传递路径;对于高度相近的侧枝,能量传递效果与连接处截面积、侧枝长度呈正相关,与生长角度呈负相关;对于同侧侧枝,随着侧枝高度增加,能量传递效果与连接处截面积、侧枝长度呈负相关;对于生长角度相近的侧枝,能量传递效果与连接处高度呈正相关,与截面积、侧枝长度呈负相关;对于长度相近的侧枝,能量传递效果与连接处高度、生长角度呈正相关,与截面积呈负相关。并通过振动试验验证分析模型的相对误差在 7.3% 以内,表明该模型具有较高的可靠性。

关键词:红枣树;能量传递;结构声强法;通量比;振动采收

中图分类号:S225.93　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)09-0237-09　　**OSID**:

Vibration Energy Transfer Characteristics of Jujube Trees Based on Structural Intensity Method

WEI Juan[1,2]　WANG Zikang[1]　MA Tingjun[3]　WANG Chuanwei[1,2]　MA Yu[1]　WU Daoxia[1]

(1. *College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an* 710054, *China*
2. *Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Detection and Control, Xi'an* 710054, *China*
3. *Jia County Forest Tree Seedlings Workstation, Yulin* 719200, *China*)

Abstract: Aiming to investigate the energy transfer characteristics and patterns of jujube trees during vibratory harvesting, a visualization analysis method for the structural intensity of jujube trees was proposed. By integrating ANSYS and self-developed Matlab programs, a structural intensity vector field analysis model for jujube trees was established, and the structural intensity vector field of jujube trees under different excitation conditions was solved and visualized. Quantitative analysis based on the vibrational energy flux ratio revealed the following: at low-frequency vibrations (the 1st and 2nd natural frequencies), energy primarily remains in the trunk; as the frequency increases (the 3rd and 4th natural frequencies), energy was uniformly transferred to various structural parts of the jujube tree. Under circular or linear excitation, energy mainly stayed in the trunk, whereas under non-circular or three-dimensional excitation, energy was evenly distributed to all structural parts of the jujube tree. As excitation time increased, the energy transfer path gradually changed, but it stabilized after 3 seconds. The energy transfer efficiency was positively correlated with excitation height. Changes in excitation force did not affect the energy transfer path. For side branches at similar heights, energy transfer efficiency was positively correlated with the cross-sectional area at the connection and the length of the side branch, but negatively correlated with the growth angle. For side branches on the same side, as the height of the side branch increased, energy transfer efficiency was negatively correlated with the cross-sectional area at the

收稿日期:2025-08-21　修回日期:2025-12-09

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2024NC-YBXM-208)和西安市科技计划项目(25NJSYB00007)

作者简介:魏娟(1968—),女,教授,博士,主要从事智能装备制造等研究,E-mail:weij@xust.edu.cn

connection and the length of the side branch. For side branches with similar growth angles, energy transfer efficiency was positively correlated with the height of the connection point but negatively correlated with the cross-sectional area and the length of the side branch. For side branches of similar length, energy transfer efficiency was positively correlated with the height of the connection point and the growth angle but negatively correlated with the cross-sectional area. Vibration experiments verified that the relative error of the analysis model was within 7.3%, indicating high reliability.

Key words: jujube tree; energy transfer; structural intensity method; flux ratio; vibratory harvesting

0 引言

我国红枣种质资源占全球的 98% 以上,产量和种植面积均位居世界首位,在红枣产业链中果实采收环节所需劳动力占全过程的 35% ~45%[1-2]。随着我国农业机械化水平的快速提升,高强度的人工劳作正逐步被机械化设备取代。目前,振动式采收是红枣机械化采收中最有应用前景的采收方式,但存在能量利用率较低及易造成果树损伤等问题,致使其在国内尚未得到实际应用[3-8]。因此,明晰振动采收过程中的能量传递特性及规律,对实现红枣的机械化采收具有重要意义。

为研究振动采收过程中的能量传递特性,早期学者多采用数值分析方法,构建林果振动采收过程中能量传递与损耗等相关的函数模型。例如,LÁNG[9]通过分析樱桃树振动等效模型,提出了樱桃树的能量损失方程;HORVÁTH 等[10]建立了振动式林果采摘机的能量损耗与激振频率的函数关系。然而,这些函数模型假设条件过于理想化,导致试验结果与实际应用存在一定偏差。因此,振动试验成为研究能量传递特性的重要手段。李斌等[11]利用动-定梳排组合式采摘机构进行荔枝采摘试验,发现当激励作用于靠近树冠外侧的侧枝时,振动能量传递至末端枝条的利用效率更高。靳文停等[12]利用对称双偏心式核桃采摘机进行田间振动试验,发现在核桃振动采摘过程中振动能量从主干激振位置向枝条自由端传递,传递距离越远,能量衰减越显著。但是,振动试验耗时耗力,且通常通过监测点处的振动位移和加速度间接获得能量传递特性。随着仿真技术的发展,部分学者利用仿真技术对振动采收过程中的能量传递特性进行了一系列研究。刘晓雯等[13]采用有限元仿真技术分析了苹果树枝在不同激励下的响应,发现振动频率越高,能量传递效率越高。伍德林等[14]建立油茶树的五自由度质量-弹性-阻尼动力学模型,通过 Matlab 仿真分析振动能量从冠层激励点向果实的传递规律,发现传递距离越长,果实获得的动能越小。然而,在这些研究中,仍未量化树体结构中振动能量的分布,无法直接揭示振动采收过程中的能量传递特性。

结构声强法[15-19]通过结合弹性结构中任意点的力和速度,来表征结构中的能量流。由于结构声强场是一个矢量场,其大小和方向能够精确描述振动能量的传递特性。因此,利用矢量场可视化技术,结构声强法可有效揭示树体结构中振动能量的主要传递路径及分布特性。

基于此,本研究采用结构声强法探究红枣树振动能量传递特性。通过 ANSYS 和 Matlab 自编程序计算结构声强值并绘制三维矢量图。进一步运用振动能量通量比量化分析不同激振条件下红枣树的振动能量传递特性以及红枣树几何特性对振动能量传递特性的影响。

1 结构声强法

结构声强法同时考虑结构的应力响应及速度响应,能够定量分析振动能量在结构内部的传递特性。结构声强定义为沿结构某一方向上单位宽度(或单位面积)的功率流,在某一瞬态时刻,结构声强 $\boldsymbol{I}_i(t)$ 的通用张量表达式[20]为

$$\boldsymbol{I}_i(t) = -\sum_i \boldsymbol{\sigma}_{ij}(t)\boldsymbol{\nu}_j(t) \quad (i,j=1,2,3) \tag{1}$$

式中 i、j——单元在三维空间内的两个方向

$\boldsymbol{\sigma}_{ij}(t)$——$j$ 方向上 t 时刻的应力张量分量

$\boldsymbol{\nu}_j(t)$——j 方向上 t 时刻的速度矢量分量

现有振动式红枣采收装备通常产生简谐激励[21]。假设简谐振动的角频率为 ω,应力和速度变化的相位角为 φ。对时间段 T 内的功率流进行积分平均化处理,有

$$I_j = \frac{1}{T}\int_0^T |\boldsymbol{\sigma}_{ij}|\cos(\omega t)\,|\boldsymbol{\nu}_j|\cos(\omega t+\varphi)\,\mathrm{d}t = \frac{1}{2}|\boldsymbol{\sigma}_{ij}|\,|\boldsymbol{\nu}_j|\cos\varphi \tag{2}$$

由此可得树体结构中振动能量随时间的变化趋势。

为分析树体结构在不同频率下的振动能量传递特性,通过傅里叶变换将时域积分转换为频域积分,有

$$I_j = \int_0^T -\boldsymbol{\sigma}_{ij}(t)\boldsymbol{\nu}_j(t)\,\mathrm{d}t = \int_{-\infty}^{\infty} -\boldsymbol{\nu}_j(t)\int_{-\infty}^{\infty}\boldsymbol{\sigma}_{ij}(\omega)\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi\omega t}\,\mathrm{d}\omega\,\mathrm{d}t = \frac{1}{2}\mathrm{Re}(\boldsymbol{\sigma}_{ij}\boldsymbol{\nu}_j^*) = -\frac{\omega}{2}\mathrm{Im}(\boldsymbol{\sigma}_{ij}u_j^*) \tag{3}$$

式中　σ_{ij}——频域内的复应力

v_j^*——速度的共轭复数

u_j^*——位移的共轭复数

对于树体结构而言，采用实体单元进行离散化能够有效还原其几何特征。实体单元为三维单元，其在直角坐标系下的正应力、剪应力及平动位移如图 1 所示。

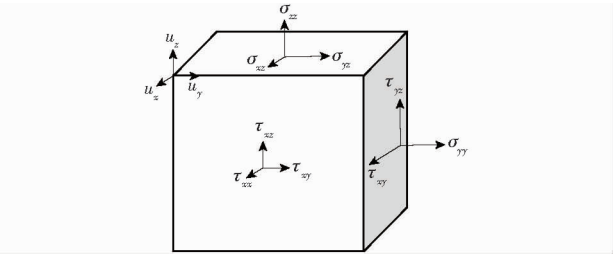


图 1　实体单元正应力、剪应力及平动位移分布

Fig. 1　Distribution of normal stress, shear stress and translational displacement of solid element

根据式(2)，在直角坐标系下，实体单元在某一时刻沿 x、y、z 方向的结构声强为

$$\begin{cases} I_x = -(\sigma_{xx}\dot{u}_x + \tau_{xy}\dot{u}_y + \tau_{xz}\dot{u}_z) \\ I_y = -(\sigma_{yy}\dot{u}_y + \tau_{xy}\dot{u}_x + \tau_{yz}\dot{u}_z) \\ I_z = -(\sigma_{zz}\dot{u}_z + \tau_{xz}\dot{u}_x + \tau_{yz}\dot{u}_y) \end{cases} \tag{4}$$

式中　σ_{xx}、σ_{yy}、σ_{zz}——单元各轴向上的正应力

τ_{xy}、τ_{xz}、τ_{yz}——单元各轴向上的剪应力

u_x、u_y、u_z——单元各轴向上的位移

从而表征树体结构中振动能量随时间的变化趋势及传递过程。

同样，根据式(3)，实体单元在某一频率下的结构声强为

$$\begin{cases} I_x = -\dfrac{\omega}{2}\mathrm{Im}(\sigma_{xx}u_x^* + \tau_{xy}u_y^* + \tau_{xz}u_z^*) \\ I_y = -\dfrac{\omega}{2}\mathrm{Im}(\sigma_{yy}u_y^* + \tau_{xy}u_x^* + \tau_{yz}u_z^*) \\ I_z = -\dfrac{\omega}{2}\mathrm{Im}(\sigma_{zz}u_z^* + \tau_{xz}u_x^* + \tau_{yz}u_y^*) \end{cases} \tag{5}$$

式中　u_x^*、u_y^*、u_z^*——单元各轴向上的共轭位移

从而表征树体结构在不同激振频率下的能量传递特性。

本文选用 Solid185 单元作为实体单元模拟树体结构。在求解结构声强矢量场时，为提高计算精度，采用节点平均法，对每个单元 8 个节点的位移进行平均化处理，将节点位移转换为单元位移，进而计算结构声强矢量场，计算式为

$$\begin{cases} u_x = \dfrac{1}{8}(u_{Ix} + u_{Jx} + u_{Kx} + u_{Lx} + u_{Mx} + u_{Nx} + u_{Ox} + u_{Px}) \\ u_y = \dfrac{1}{8}(u_{Iy} + u_{Jy} + u_{Ky} + u_{Ly} + u_{My} + u_{Ny} + u_{Oy} + u_{Py}) \\ u_z = \dfrac{1}{8}(u_{Iz} + u_{Jz} + u_{Kz} + u_{Lz} + u_{Mz} + u_{Nz} + u_{Oz} + u_{Pz}) \end{cases} \tag{6}$$

式中　u_{Ix}、u_{Iy}、u_{Iz}——节点 I 各轴向上的位移

u_{Jx}、u_{Jy}、u_{Jz}——节点 J 各轴向上的位移

u_{Kx}、u_{Ky}、u_{Kz}——节点 K 各轴向上的位移

u_{Lx}、u_{Ly}、u_{Lz}——节点 L 各轴向上的位移

u_{Mx}、u_{My}、u_{Mz}——节点 M 各轴向上的位移

u_{Nx}、u_{Ny}、u_{Nz}——节点 N 各轴向上的位移

u_{Ox}、u_{Oy}、u_{Oz}——节点 O 各轴向上的位移

u_{Px}、u_{Py}、u_{Pz}——节点 P 各轴向上的位移

2　红枣树结构声强矢量场分析模型

红枣树结构声强矢量场通过 ANSYS 和 Matlab 自编程序组成的计算系统获得，并结合数据可视化技术生成结构声强矢量场图，分析模型构建流程如图 2 所示。

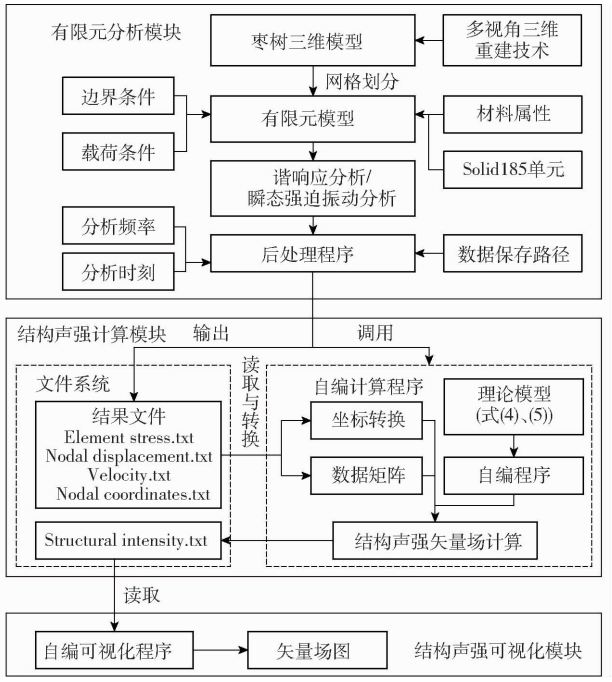
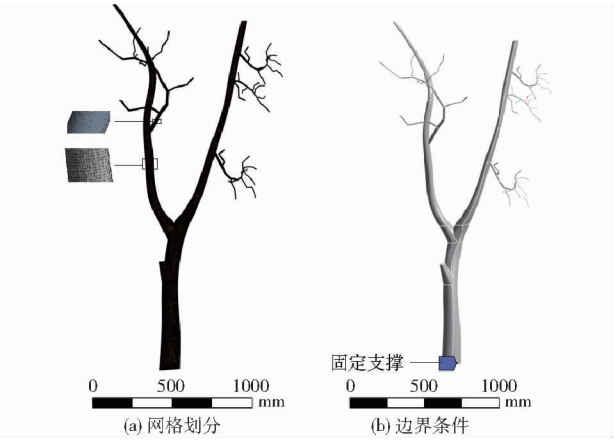


图 2　红枣树结构声强矢量场分析模型构建流程图

Fig. 2　Flowchart of construction process for jujube tree structural intensity vector field analysis model

首先，运用多视角三维重建技术建立红枣树三维模型，在此基础上在 ANSYS 中构建有限元模型，网格划分采用全局尺寸 5 mm，侧枝局部细化至 2 mm，如图 3a 所示，单元设置为 Solid185 单元，并赋予表 1 所示的材料参数[22-23]，同时对红枣树主干底部施加边界条件“固定支撑”，以模拟红枣树和地面之间的连接情况，如图 3b 所示，然后进行谐响应分析和瞬态强迫振动分析。其次，运用自编后处理程序，输入分析所需的频率、时间以及数据储存路径等信息，将计算结构声强矢量场所需的单元应力(Element stress. txt)、节点速度(Velocity. txt)、节点位移(Nodal displacement. txt)和节点坐标(Nodal coordinates. txt)等数据保存至文件系统中。然后，运



(a) 网格划分 (b) 边界条件

图 3 红枣树有限元模型

Fig. 3 Finite element models of jujube trees

表 1 红枣树材料参数

Tab. 1 Material parameters of jujube trees

结构部位	密度/(kg·m^{-3})	杨氏模量/MPa	泊松比	阻尼比
主干	478	6 650	0.328	0.3
分枝	462	6 650	0.328	0.3

用自编结构声强矢量场计算程序,读取文件系统中的初始数据,进行数据转换计算出红枣树的结构声强矢量场数据,并将计算结果(Structural intensity. txt)保存至文件系统中。接着,自编可视化程序读取结果文件中单元节点位置的对应关系数据以及红枣树结构声强矢量场的计算结果,并将结果映射至对应单元,完成红枣树结构声强矢量场的绘制,实现红枣树结构声强矢量场的可视化。

3 红枣树振动能量传递特性

课题组相关研究成果表明[22-25],激振频率、激振方式、激振时间、激振高度和激振力对红枣树的振动响应具有显著影响。因此,本文主要研究上述因素以及红枣树几何特性对能量传递特性的影响。

在振动采收过程中,红枣树发生共振可显著提升采收效果,因此,为得到振动能量传递特性与固有频率之间的关系,对图 3 所示的有限元模型进行模态分析,提取前 5 阶固有频率,分别为 5.47、7.31、9.33、10.16、18.74 Hz。由图 4 可知,在第 5 阶(18.74 Hz)固有频率下,红枣树末端枝条变形显著,易造成果树损伤。因此,在振动采收中激振频率应控制在前 4 阶固有频率。

采用红枣树结构声强矢量场分析模型,分别以激振频率、激振方式、激振时间、激振高度和激振力 5 个因素之一作为单一变量,其他因素保持恒定,且恒定值取激振频率为 9.33 Hz,激振方式为双体多向型,激振时间为 4 s,激振高度为 600 mm,激振力为

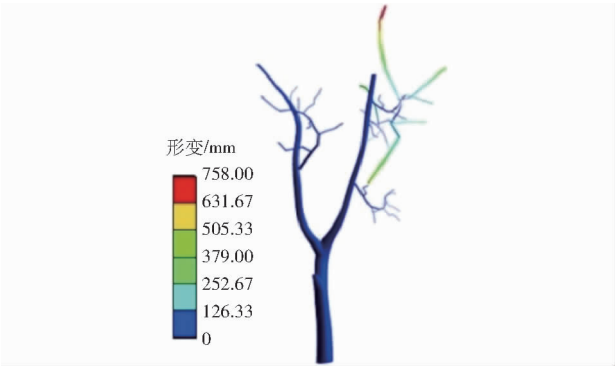


图 4 红枣树第 5 阶模态响应云图

Fig. 4 Cloud map of the 5th mode response of jujube tree

3 500 N。计算红枣树在不同激振条件下的结构声强矢量场,从而获得红枣树的结构声强分布。根据前期预试验,激振频率、激振方式、激振高度、激振力作为变量时各设置 4 个值,激振时间作为变量时设置 8 个值,各因素不同取值如表 2 所示。

表 2 各因素不同取值

Tab. 2 Different values of each factor

水平	因素				
	激振频率/Hz	激振方式	激振时间/s	激振高度/mm	激振力/N
1	5.47	单体回旋型	0.5	200	2 500
2	7.31	双体平衡型	1.0	400	3 500
3	9.33	双体多向型	1.5	600	4 500
4	10.16	双体垂直型	2.0	800	5 500
5			2.5		
6			3.0		
7			3.5		
8			4.0		

为量化分析红枣树中的能量传递特性,将红枣树结构划分为主干 A、侧枝 B、侧枝 C、侧枝 D 和侧枝 E 共 5 个区域,对各区域进行编号,如图 5 所示。并定义振动能量通量比 R 为

$$R = \frac{P_{\mathrm{Flux}}}{P_{\mathrm{tot}}} \times 100\% \tag{7}$$

式中 P_{Flux}——通过结构连接截面向侧枝传递的振动能量

P_{tot}——总输入振动能量

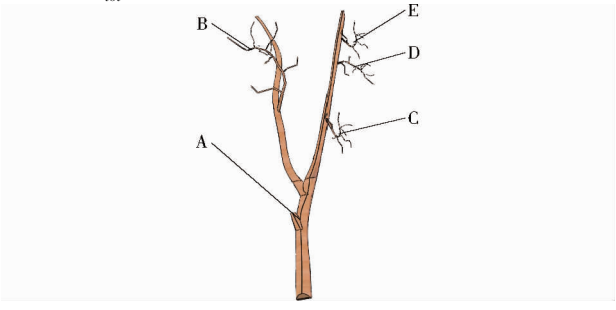


图 5 红枣树结构编号

Fig. 5 Structural numbering of jujube trees

3.1　不同激振条件对红枣树能量传递特性的影响

3.1.1　不同激振频率下红枣树能量传递特性

分别计算各激振频率下红枣树整体的结构声强并绘制各频率下红枣树结构声强三维矢量图，如图 6 所示。计算各侧枝与主干连接处的振动能量通量比，结果如表 3 所示。

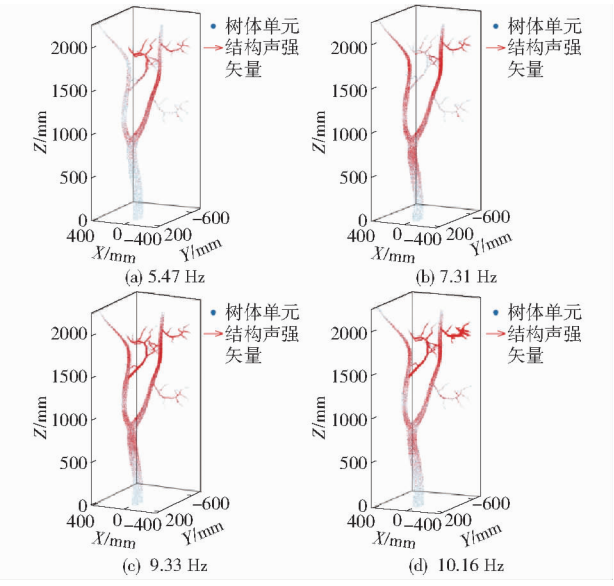


图 6　不同激振频率下红枣树结构声强三维矢量图

Fig. 6　Three-dimensional vector diagrams of structural intensity for jujube trees at different excitation frequencies

表 3　不同激振频率下红枣树各结构振动能量通量比

Tab. 3　Vibration energy flux ratio of jujube trees structures at different excitation frequencies　%

激振频率/Hz	结构部位			
	侧枝 B	侧枝 C	侧枝 D	侧枝 E
5.47	35.25	3.22	5.46	13.27
7.31	9.28	4.42	14.60	18.83
9.33	25.51	13.58	16.91	20.71
10.16	21.19	11.39	17.96	25.20

依据前 4 阶固有频率和图 6、表 3 可知，红枣树在 5.47 Hz 和 7.31 Hz 频率激励下（对应第 1 阶和第 2 阶固有频率），能量难以均匀地传递至各结构部位，高达 42.80% 或 52.87% 的能量滞留在主干 A，导致部分侧枝获得的能量较少，造成大量能量浪费；而红枣树在 9.33 Hz 和 10.16 Hz 频率激励下（对应第 3 阶和第 4 阶固有频率），振动能量能够较均匀地传递至红枣树各结构部位。

3.1.2　不同激振方式下红枣树能量传递特性

分别计算各激振方式下红枣树整体的结构声强并绘制各激振方式下红枣树结构声强三维矢量图，如图 7 所示。计算各侧枝与主干连接处的振动能量通量比，结果如表 4 所示。

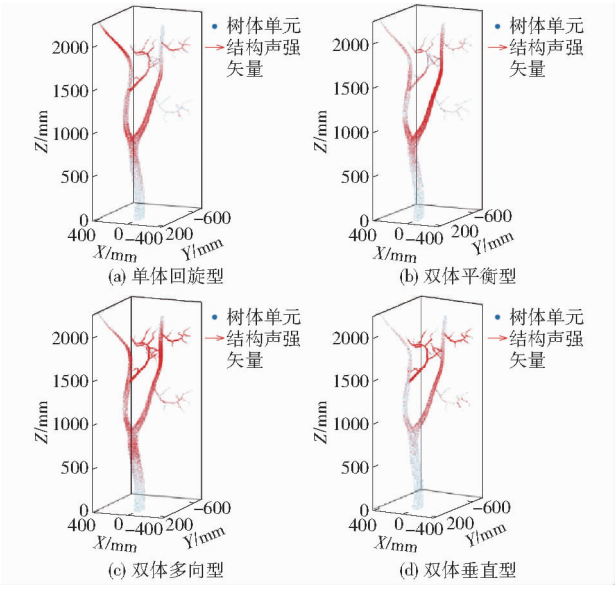


图 7　不同激振方式下红枣树结构声强三维矢量图

Fig. 7　Three-dimensional vector diagrams of structural intensity for jujube trees by different excitation methods

表 4　不同激振方式下红枣树各结构振动能量通量比

Tab. 4　Vibration energy flux ratio of jujube trees structures by different excitation methods　%

激振方式	结构部位			
	侧枝 B	侧枝 C	侧枝 D	侧枝 E
单体回旋型	21.67	3.60	5.10	17.75
双体平衡型	20.49	10.05	11.31	13.58
双体多向型	25.51	13.58	16.91	20.71
双体垂直型	27.81	16.51	18.82	22.39

由图 7 和表 4 可知，当激振方式为单体回旋型和双体平衡型时，高达 51.88% 或 44.57% 的能量滞留在主干 A，部分侧枝获得的能量较少。其中，单体回旋型激振方式产生圆周激励；双体平衡型激振方式产生直线激励。因此，当激振方式为圆周激励或直线激励时，能量利用率较低。相比之下，当激振方式为双体多向型和双体垂直型时，能量能够较均匀地传递至红枣树各结构部位。其中，双体多向型激振方式产生非圆周激励；双体垂直型激振方式产生三维激励。因此，当激振方式为非圆周激励或三维激励时，能量利用率较高。

3.1.3　不同激振时间下红枣树能量传递特性

分别计算各激振时间下红枣树整体的结构声强并绘制各激振时间下红枣树结构声强三维矢量图，如图 8 所示。计算各侧枝与主干连接处的振动能量通量比，结果如表 5 所示。

由图 8 和表 5 可知，当激振时间达到 0.5 s 时，绝大部分能量滞留在未分叉的主干 A，能量主要沿路径Ⅰ、Ⅱ传递，路径Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ传递的能量总和

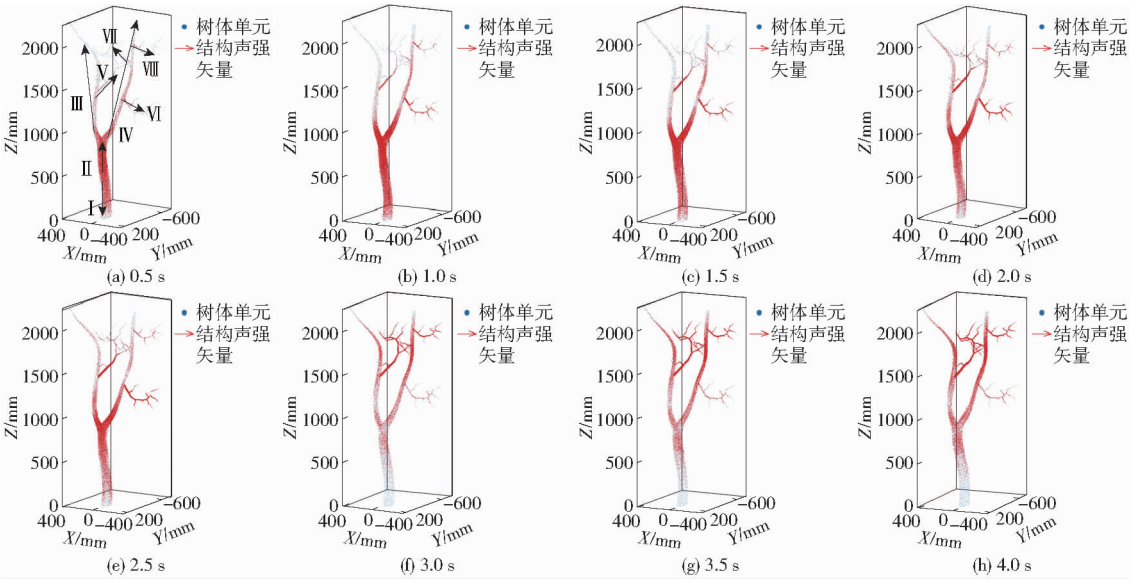


图 8 不同激振时间下红枣树结构声强三维矢量图

Fig. 8 Three-dimensional vector diagrams of structural intensity for jujube trees at different excitation time

表 5 不同激振时间下红枣树各结构振动能量通量比

Tab. 5 Vibration energy flux ratio of jujube trees structures at different excitation time %

激振时间/s	结构部位			
	侧枝 B	侧枝 C	侧枝 D	侧枝 E
0.5	0.90	1.36	0.31	0.73
1.0	4.55	6.82	1.38	1.88
1.5	8.74	10.14	1.96	2.42
2.0	11.67	14.75	2.60	3.10
2.5	21.58	19.49	8.05	7.31
3.0	25.51	13.58	16.91	20.71
3.5	25.51	13.58	16.91	20.71
4.0	25.51	13.58	16.91	20.71

仅为 3.30%，且优先通过路径Ⅲ向Ⅴ以及路径Ⅳ向Ⅵ进行传递。随着激振时间从 0.5 s 增加至 2.0 s，大部分能量仍滞留在主干 A，但路径Ⅰ所传递的能量逐渐减少，能量主要通过路径Ⅱ传递至路径Ⅲ和Ⅳ，同时路径Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ传递的能量逐渐增加，且能量仍优先通过路径Ⅲ向Ⅴ以及路径Ⅳ向Ⅵ进行传递。当激振时间达到 2.5 s 时，主干 A 中滞留的能量显著减少，传递至各侧枝的能量几乎成倍增加，且沿路径Ⅰ传递的能量继续减少，能量主要通过路径Ⅱ至Ⅲ再至Ⅴ以及路径Ⅱ至Ⅳ再至Ⅵ进行传递。当激振时间达到 3 s 时，能量较均匀地传递至红枣树各结构部位，能量主要通过路径Ⅱ至Ⅲ再至Ⅴ以及路径Ⅱ至Ⅳ再至Ⅷ进行传递。当激振时间超过 3 s 时，能量传递路径保持不变，同时红枣树各结构部位的能量持续增加，但其占总输入能量的比值不再发生变化。

上述分析表明，在激振初期（1.0 s 前），输入振动能量随振动波由激振点沿主干 A 向下传递至根部、向上扩散至各侧枝，实现能量由近及远地传递。随着激振时间的延长（1.0 ~ 3.0 s），持续输入的振动能量导致红枣树出现局部共振现象，能量优先传递至局部共振区域，导致能量传递路径发生变化。当激振时间大于等于 3.0 s 时，红枣树整体进入稳态共振，能量传递路径和各结构部位振动能量通量比不再发生变化，此时激振时间的延长仅影响红枣树各结构部位的能量积累。

3.1.4 不同激振高度下红枣树能量传递特性

分别计算各激振高度下红枣树整体的结构声强并绘制各激振高度下红枣树结构声强三维矢量图，如图 9 所示。计算各侧枝与主干连接处的振动能量通量比，结果如表 6 所示。

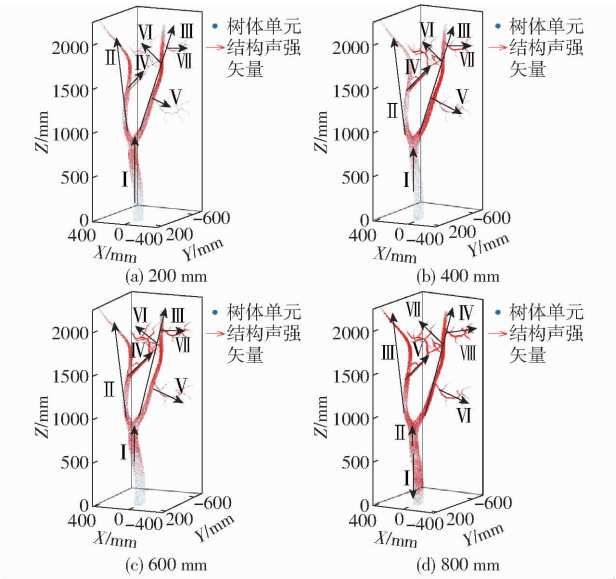


图 9 不同激振高度下红枣树结构声强三维矢量图

Fig. 9 Three-dimensional vector diagrams of structural intensity for jujube trees at different excitation heights

表 6　不同激振高度下红枣树各结构振动能量通量比

Tab. 6　Vibration energy flux ratio of jujube trees structures at different excitation heights　%

激振高度/mm	结构部位			
	侧枝 B	侧枝 C	侧枝 D	侧枝 E
200	19.53	6.38	9.52	15.77
400	21.70	7.80	12.41	19.32
600	25.51	13.58	16.91	20.71
800	21.40	15.22	18.07	21.41

由图 9 和表 6 可知，不同激振高度对振动采收过程中的能量传递特性具有显著影响，传递至红枣树各结构部位的能量值差异较大，且能量传递路径存在显著变化。当激振位置较低时，能量传递路径如图 9a、9b、9c 所示；随着激振位置的升高，新增一条从激振位置沿主干 A 向地面传递能量的路径，如图 9d 所示。随着激振位置升高，振动能量通量比逐步增加，能量利用率显著提高。当激振位置低于未分叉主干高度的 1/2 时，大部分能量滞留在主干 A，部分侧枝获得的能量较少；当激振位置高于未分叉主干高度的 1/2 时，能量能够较均匀地传递至红枣树各结构部位。

3.1.5　不同激振力下红枣树能量传递特性

分别计算各激振力下红枣树整体的结构声强并绘制各激振力下红枣树结构声强三维矢量图，如图 10 所示。计算各侧枝与主干连接处的振动能量通量比，结果如表 7 所示。

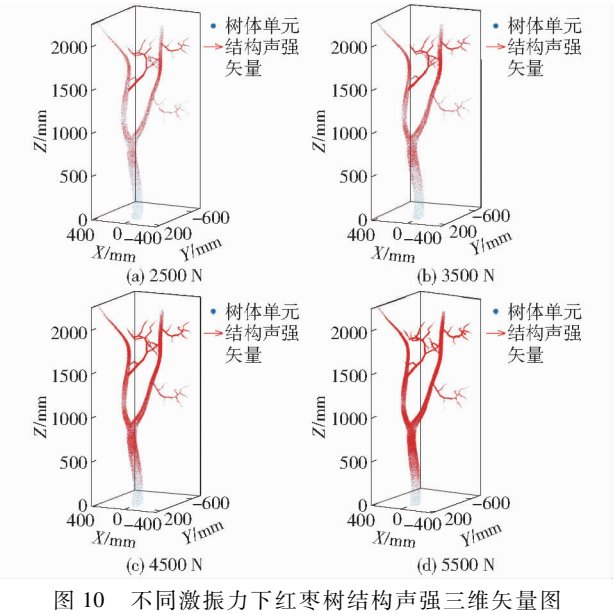


图 10　不同激振力下红枣树结构声强三维矢量图

Fig. 10　Three-dimensional vector diagram of structural intensity for jujube trees under different excitation force

由图 10 和表 7 可知，当以不同激振力进行振动采收时，振动能量通量比保持一致，但随着激振力增大，红枣树各结构部位的结构声强矢量逐渐增大。

表 7　不同激振力下红枣树各结构振动能量通量比

Tab. 7　Vibration energy flux ratio of jujube trees structures at different excitation force　%

激振力/N	结构部位			
	侧枝 B	侧枝 C	侧枝 D	侧枝 E
2 500	25.51	13.58	16.91	20.71
3 500	25.51	13.58	16.91	20.71
4 500	25.51	13.58	16.91	20.71
5 500	25.51	13.58	16.91	20.71

因此，改变激振力不会影响能量利用率，仅影响红枣树各结构部位的振动响应强度。

3.2　红枣树几何特性对振动能量传递特性的影响

红枣树的几何特性主要包括侧枝与主干连接处的高度和截面积、侧枝长度、侧枝生长角度以及木质硬度等参数。由于红枣树整体木质硬度差异较小，且木质硬度与杨氏模量呈正相关，由表 1 可知红枣树整体杨氏模量一致，故木质硬度对红枣树振动能量传递特性的影响可忽略。因此，本文仅分析侧枝与主干连接处的高度和截面积、侧枝长度以及侧枝生长角度对红枣树振动能量传递特性的影响。

测量各侧枝与主干连接处的高度和截面积、侧枝生长角度（以垂直地面向上为正方向）以及侧枝长度，结果如表 8 所示。并对表 3、4、6 的结果进行归纳整理，得到在相同激振条件下有：当侧枝位于主干不同侧且与主干连接处高度相近时，能量优先传递至与主干连接处截面积较大、侧枝长度较长以及侧枝生长角度较小的侧枝；当侧枝位于主干同侧时，随着侧枝与主干连接处高度的增大、截面积的减小以及侧枝长度的减小，传递至各侧枝的能量逐步增多；当侧枝生长角度相近时，能量优先传递至与主干连接处高度较高、截面积较小以及侧枝长度较短的侧枝；当侧枝长度相近时，能量优先传递至与主干连接处高度较高、截面积较小以及侧枝生长角度较大的侧枝。

表 8　各侧枝生长参数

Tab. 8　Growth parameters of each side branch

生长参数	结构部位			
	侧枝 B	侧枝 C	侧枝 D	侧枝 E
高度/mm	1 461.70	1 316.40	1 733.08	1 912.07
面积/mm^2	568.52	167.24	108.27	92.70
角度/(°)	44.30	127.86	80.76	132.70
长度/mm	937.16	575.07	458.17	444.39

3.3　试验

为进一步验证红枣树结构声强矢量场分析模型的准确性，运用课题组研发的“双体多向型激振装

置”进行振动试验，如图 11a 所示，取模型仿真的恒定值作为试验参数，即激振频率为 9.33 Hz、激振时间为 4.0 s、激振高度为 600 mm、激振力为 3 500 N，并按照图 11b 所示的测点布置加速度传感器（型号：DH186；灵敏度：100 mV/g）。通过江苏东华测试技术股份有限公司的 DH5902 型数据采集仪进行数据采集，并通过 Matlab 进行数据处理，以测点 1 处动能累加值表示总输入振动能量，以测点 2、3、4、5 处动能累加值表示传递至侧枝的振动能量，依据式(7)计算振动能量通量比，将试验结果与相同激振条件下模型仿真的结果进行比较，如表 9 所示。

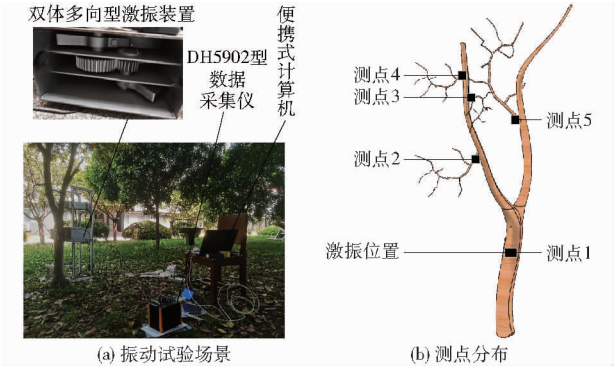


图 11 振动试验

Fig. 11 Vibration test

表 9 各结构振动能量通量比对比

Tab. 9 Comparison of vibration energy flux ratios of each structure %

参数	结构部位			
	侧枝 B	侧枝 C	侧枝 D	侧枝 E
模型仿真值	25.51	13.58	16.91	20.71
试验值	23.90	12.99	16.01	19.31
相对误差	6.74	4.54	5.62	7.25

振动试验中各结构的振动能量通量比均低于模型仿真结果，可能由于模型枝叶浓密程度小于实际树体造成。但振动试验与模型仿真结果的最大相对误差不超过 7.3%，表明红枣树结构声强矢量场分析模型具有较高的准确性。

4 结论

(1)提出了一种基于结构声强法与矢量场可视化技术的红枣树振动能量传递特性分析方法，通过 ANSYS 与 Matlab 自编程序相结合的手段，以结构声强矢量场精确揭示树体结构中振动能量的主要传递路径及分布特性，进一步运用振动能量通量比，量化分析了不同激振条件下红枣树的振动能量传递特性以及红枣树几何特性对振动能量传递特性的影响规律。与现有振动采收过程中能量传递研究方法相比，本文方法考虑因素更全面，能够更精确、直观地揭示振动采收过程中的能量传递特性。

(2)在低频率振动(1 阶、2 阶固有频率)时，能量易滞留在主干 A；当激振频率达到 9 ~ 11 Hz 时(3 阶、4 阶固有频率)，能量能够较均匀地传递至红枣树各结构部位。在圆周激励或直线激励下，能量利用率较低，而在非圆周激励或三维激励下，能量利用率较高。当激振时间达到 3 s 后，时间的变化仅影响红枣树各结构部位能量的积累，不改变传递路径。随着激振位置的升高，能量利用率显著提高。激振力的改变不影响能量利用率，仅影响红枣树各结构部位的振动响应强度。

(3)在相同激振条件下，对位于主干不同侧且连接处高度相近的侧枝，能量优先传递至连接处截面积较大、侧枝长度较长及生长角度较小的侧枝；对位于主干同侧的侧枝，随着连接处高度增大、截面积减小及侧枝长度减小，传递至侧枝的能量逐步增多；对侧枝生长角度相近的侧枝，能量优先传递至连接处高度较高、截面积较小及侧枝长度较短的侧枝；对侧枝长度相近的侧枝，能量优先传递至连接处高度较高、截面积较小及生长角度较大的侧枝。

(4)通过振动试验表明，试验数据与仿真结果的相对误差在 7.3% 以内，验证了红枣树结构声强矢量场分析模型具有较高的准确性。

参 考 文 献

[1] 邢钟毓，莎仁图雅，邢钰坤，等. 我国红枣产业发展研究现状[J]. 农业与技术，2025，45(4)：84 - 88.
[2] 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): 144 - 160. (in Chinese)
[3] 焦灏博，罗炬明，汤爱沸，等. 基于 TRIZ 理论的半径可调式林果振动采收激振器设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(11)：231 - 239.
JIAO Haobo, LUO Juming, TANG Aifei, et al. Design and test of radius adjustable fruit vibration harvesting exciter based on TRIZ theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 231 - 239. (in Chinese)
[4] 孙景彬，刘志杰，杨福增，等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报，2023，54(5)：1 - 18.
SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1 - 18. (in Chinese)
[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] 王韦韦,陈黎卿,杨洋,等.农业机械底盘技术研究现状与展望[J].农业机械学报,2021,52(8):1 - 15.
WANG Weiwei, CHEN Liqing, YANG Yang, et al. Development and prospect of agricultural machinery chassis technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 1 - 15. (in Chinese)
[7] 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)
[8] 王攀,何婷婷,王春霞,等.我国特色林果机械化采收技术现状[J].中国农机化学报,2025,46(7):48 - 54.
WANG Pan, HE Tingting, WANG Chunxia, et al. Current status of mechanized harvesting technology for characteristic forest fruits in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(7): 48 - 54. (in Chinese)
[9] LÁNG Z. Dynamic modelling structure of a fruit tree for inertial shaker system design[J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(1): 35 - 44.
[10] HORVÁTH E, SITKEI G. Energy consumption of tree shakers as a function of frequency[J]. Progress in Agricultural Engineering Sciences, 2010, 6(1): 73 - 83.
[11] 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)
[12] 靳文停,赵金辉,庄腾飞,等.核桃机械振动采摘枝干能量传递特性研究[J].农业机械学报,2024,55(12):221 - 230.
JIN Wenting, ZHAO Jinhui, ZHUANG Tengfei, et al. Energy transfer characteristics of walnut trunk and branches in mechanical vibration picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 221 - 230. (in Chinese)
[13] 刘晓雯,郭彩玲.基于振动采摘的苹果树枝干动力学特性[J].林业工程学报,2021,6(3):120 - 126.
LIU Xiaowen, GUO Cailing. Study on dynamic characteristics of apple tree branches based on vibration picking[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(3): 120 - 126. (in Chinese)
[14] 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)
[15] NOISEUX D U. Measurement of power flow in uniform beams and plates[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1970, 47(1): 238 - 247.
[16] HAMBRIC S A. Power flow and mechanical intensity calculations in structural finite element analysis[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1990, 112(4): 542 - 549.
[17] 马英群,徐蒙,张锴,等.基于结构声强法的机匣振动能量传递特性[J].航空学报,2019,40(9):221 - 237.
MA Yingqun, XU Meng, ZHANG Kai, et al. Vibration energy transmission characteristics of casing based on structural intensity method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(9): 221 - 237. (in Chinese)
[18] 王逢德,马云腾,葛新灿,等.稳态激励下往复式天然气压缩机橇座的振动能量传递特性[J].中国石油大学学报(自然科学版),2025,49(3):205 - 213.
WANG Fengde, MA Yunteng, GE Xincan, et al. Vibration energy transfer characteristics of reciprocating natural gas compressor skid base under steady-state excitation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2025, 49(3): 205 - 213. (in Chinese)
[19] 贾泽坤,孙孟,张冠军,等.泵设备成组筏架振动传递路径分析及优化设计[J].哈尔滨工程大学学报,2025,46(1):87 - 94.
JIA Zekun, SUN Meng, ZHANG Guanjun, et al. Vibration transmission path analysis and optimization design of group rafts in pump equipment[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(1): 87 - 94. (in Chinese)
[20] GAVRIĆ L, PAVIĆ G. A finite element method for computation of structural intensity by the normal mode approach[J]. Journal of Sound and Vibration, 1993, 164(1): 29 - 43.
[21] 范志远,曲振兴,汤晶宇,等.国外机械振动式林果收获装备研究现状与展望[J].林业机械与木工设备,2024,52(1):4 - 12,19.
FAN Zhiyuan, QU Zhenxing, TANG Jingyu, et al. Research status and prospect of mechanical vibrating forest fruit harvesting equipment abroad[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2024, 52(1): 4 - 12,19. (in Chinese)
[22] 杨广元.基于多视角枣树模型构建及振动仿真试验研究[D].西安:西安科技大学,2021.
YANG Guangyuan. Research on jujube tree model construction and vibration simulation experiment based on multi-view[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
[23] 胡定贤.基于双体多向机构的红枣采收装置分析及研制[D].西安:西安科技大学,2023.
HU Dingxian. Analysis and development of jujube harvesting device based on dual body multidirectional mechanism[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
[24] WEI J, YANG G Y, YAN H, et al. Rigid-flexible coupling simulation and experimental vibration analysis of pistachio tree for optimal mechanized harvesting efficiency[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2021, 28(22): 2360 - 2369.
[25] 魏娟,王新岭,刘永,等.红枣振动响应分析及激振参数研究[J].西北林学院学报,2025,40(2):226 - 235.
WEI Juan, WANG Xinling, LIU Yong, et al. Vibration response and excitation parameters of red jujube[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2025, 40(2): 226 - 235. (in Chinese)