

林 欢,孙磊厚,王二化. 树冠结构与树木固有特性的关系研究[J]. 江苏农业科学,2021,49(20):166-171.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.20.026

树冠结构与树木固有特性的关系研究

林 欢,孙磊厚,王二化

(常州信息职业技术学院智能装备学院,江苏常州 213164)

摘要:为了研究树冠结构形态与树木振动特性之间的关系,在室内选择 3 个桦树主干和 10 个树冠构成新的样品树,采用绳拉法测试其固有特性,同时在室外进行试验验证。结果表明,树冠对样品树的质量分布具有显著影响,能够快速降低其固有频率,但是对阻尼比的影响较小。当振幅较小时,树叶质量对样品树固有频率的影响并不显著,树木主要还是依靠树枝来耗散振动能量。单独主干及带叶树冠样品树的固有频率与样品树的总质量之间均存在二次函数关系,而去叶树冠样品树的固有频率与样品树的总质量之间存在三次函数关系。

关键词:树冠;形态结构;固有特性;固有频率;阻尼比

中图分类号:S718.42 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)20-0166-06

我国具有丰富的林业资源和种类繁多的树木,林业在现代社会经济中发挥着重要作用^[1-3]。树木的主要力学特性为固有频率和阻尼比,固有频率是树木做自由振动时的频率。其位移随时间按正弦或余弦规律变化,与初始条件、外力载荷大小无关,仅与系统的固有特性有关,是风振响应分析的基础^[4-5]。在树木风致振动过程中存在多种阻尼,树木冠层的空气阻力对能量耗散及传输转移起到了很大作用,能够快速降低树木的振动和能量,进一步提高树木的稳定性^[6-7]。因此,对树木结构固有特性的研究是为了更好地研究树木在风振下的响应特性,进而减少风害对树木的破坏。许多研究者对树木的固有频率进行了测量,发现风速能够影响树木的固有频率,且对一阶固有频率的影响较大^[8-9]。Baker 通过远程激光法测量树的固有频率,发现固有频率受到几何外观与季节的影响^[10]。Jonsson 等对挪威云杉进行了人工拉伸试验,发现无论在平地还是斜坡上,固有频率没有差异,地形对固有频率并无影响^[11]。振动阻尼对于树木承受强

风起到至关重要的作用,使用共振放大法和半功率法可以计算出阻尼比^[12]。Milne 对北美云杉的固有特性进行了研究,通过树干尺寸、密度和弹性模量推测其固有频率大约为 0.35 Hz,阻尼主要受树枝之间相互碰撞与空气阻尼的影响,且与树干直径呈线性相关^[13]。

树冠是树木的重要组成部分,是为树木提供营养物质的重要场所,主要由树枝、树叶组成^[14],具有很强的随机性及自相似性。大量试验和理论都已证实,树冠的空间结构、质量分布、力学特性等对树木的固有特性有较大影响^[15-16]。Moore 等研究树冠对树木固有频率的影响时发现,至少需要剔除 80% 冠层质量,树木的固有频率才会发生显著变化,因此遇到强风时基本不会改变其固有特性^[17]。此外,Moore 等还发现,树木的固有特性受质量、大小、枝干长度、胸径、冠形特征等因素影响,固有频率与树木的胸径与高度平方的比(DBH/H^2)呈高度线性相关,树木的内阻尼一般小于 0.05 且与直径无关,外阻尼受空气阻尼的影响^[18-19]。

现有研究主要给出了树木固有频率与树枝高度、胸径、长度等物理参数之间的关系,目前尚无关于不同树冠、相同主干条件下树木整体的固有特性及活体立木质量与固有频率之间关系的研究。因此,本研究采用组合结构方式对不同形态下树的固有特性差异进行研究,以期为进一步深化研究树的固有特性提供一定的理论依据。

收稿日期:2021-03-13

基金项目:江苏省高等学校自然科学基金项目(编号:19KJB210007);常州市应用基础研究计划(编号:CJ20190023);常州信息职业技术学院科研课题青年基金(编号:CXZK201804Q);常州信息职业技术学院科研平台项目(编号:PYPT201804G);常州高技术重点实验室项目(编号:CM20183004);江苏省青蓝工程优秀教学团队资助项目。

作者简介:林 欢(1991—),女,江苏徐州人,博士,讲师,主要从事现代机械设计理论与方法研究。E-mail:huanlinphd@163.com。

1 材料与装置

1.1 试验材料

在南京林业大学校园内选取 3 个榉树主干和 10 个树冠,在试验过程中主干被夹持在固定装置

上,主干与树冠连接处沿着中心线各锯掉一半,利用铁丝、热熔胶等将两者进行固定连接,构成新的样品树整体,详见图 1。为了保持样品树的基本特性,全部试验在 1 d 内完成。

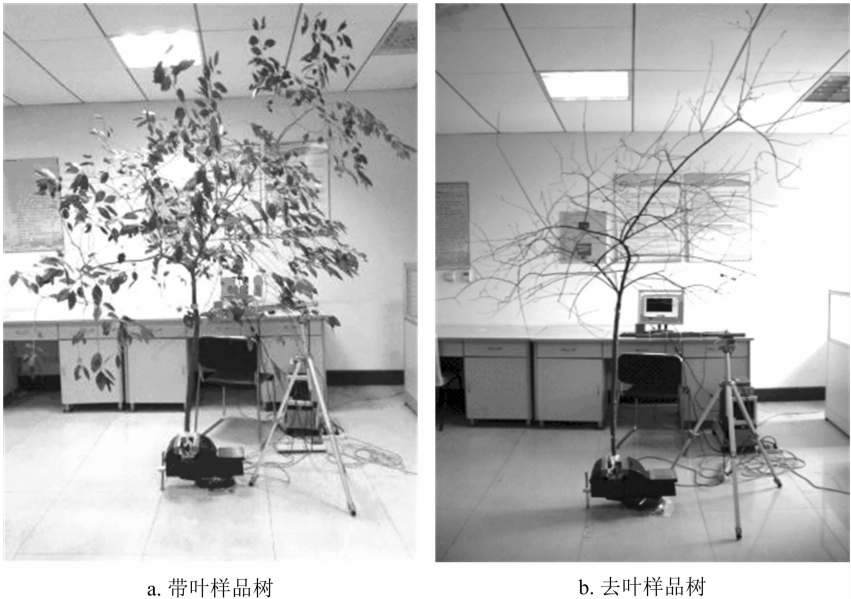


图1 试验用样品树

测量过程中的主干底径(D_1)是指主干底部的直径;胸径(D_2)是指主干高度一半位置处的直径;冠底径(d)是指位于树冠底部的直径;冠高(h)是指从树冠底端到树冠最顶端的距离;冠幅(l)是指同一水平面内树冠两端的最远距离;去叶前质量(m_1)是指带叶树冠的质量;去叶后质量(m_2)是指去掉叶片后树冠的质量;叶片质量(Δm)指树冠叶片的总质量;平均叶片质量(m_3)、平均叶片面积(S)是指从树冠上随机选取 50 张叶片进行测量所得平均值,其

余参数均为 3 次测量的平均值,主干、树冠的形态参数分别如表 1、表 2 所示。

表 1 试验用 3 个榉树主干参数

主干	底径 (cm)	胸径 (cm)	高度 (cm)	质量 (kg)
I	3.05	2.65	79.00	0.21
II	2.60	2.40	81.00	0.30
III	4.20	3.45	66.00	0.44

表 2 试验用 10 个树冠参数

树冠编号	冠底径 (cm)	冠高 (cm)	冠幅 (cm)	去叶前质量 (kg)	去叶后质量 (kg)	叶片质量 (kg)	平均叶片质量 (g)	叶片数 (张)
1 号	2.00	185.00	195.00	0.98	0.41	0.57	0.28	2 035
2 号	2.57	260.00	300.00	1.78	1.13	0.65	0.34	1 912
3 号	1.35	145.00	140.00	0.26	0.11	0.15	0.20	750
4 号	1.22	159.00	130.00	0.28	0.15	0.13	0.19	684
5 号	2.05	160.00	200.00	0.92	0.47	0.45	0.22	2 045
6 号	1.73	200.00	220.00	0.54	0.26	0.28	0.21	1 333
7 号	1.00	92.00	125.00	0.14	0.05	0.09	0.14	643
8 号	1.23	175.00	160.00	0.29	0.13	0.16	0.26	615
9 号	1.31	130.00	125.00	0.34	0.08	0.26	0.18	1 444
10 号	1.83	250.00	210.00	1.28	0.61	0.67	0.27	2 481

1.2 测试装置及方法

固有特性测试装置主要包括 12 V 稳压电源、SICK 激光位移传感器 (OD2 - P85W2010)、高速便捷式 USB (通用串行总线) 数据采集箱 (HRU - 420E) 和振动测试分析软件 (Hrsoft - DW V1.3) [20], 详见图 2。

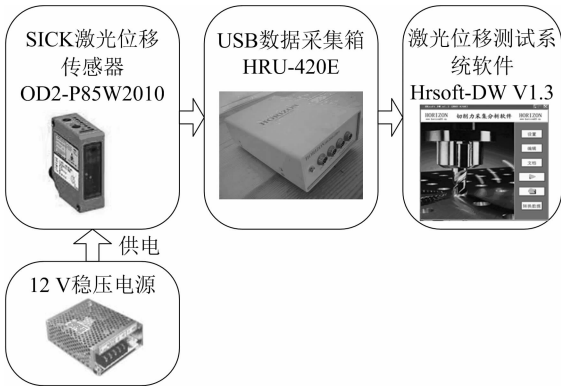


图2 固有特性测试装置

激光位移传感器安装在三脚架上,在样品树主干约 50 cm 高度处粘贴金属片并确保其与树干相切,调节三角架位置使位移传感器对准测点处,USB 数据采集箱能够将传感器收集的信号传到电脑分析软件中进行数据处理。

在试验过程中,通过绳子施加外力给样品树一个冲击载荷,样品树在阻尼作用下做自由衰减运动,通过传感器记录样品树的位移响应曲线。测试结果表明,样品树的振动位移最大值随着时间的变化呈现指数衰减规律,其位移响应曲线如图 3 所示。

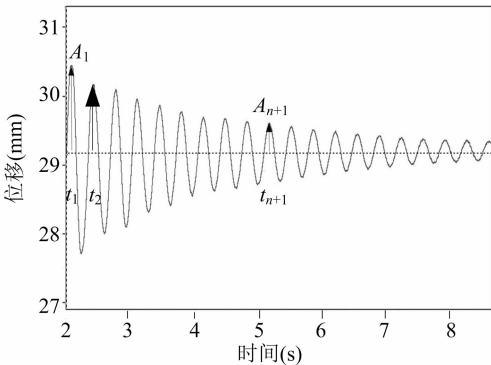


图3 自由衰减下样品树的位移响应曲线

依据图 3 所得位移衰减曲线,样品树的固有频率、阻尼比可以通过以下公式求得:

$$\omega_1 = \frac{1}{t_2 - t_1}; \tag{1}$$

$$\omega_1 = \frac{n}{t_{n+1} - t_1}; \tag{2}$$

$$\zeta = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_{n+1}}\right)}{n \cdot 2\pi}。 \tag{3}$$

式中: ω_1 为固有频率; ζ 为阻尼比; t_1 、 t_2 、 t_{n+1} 分别为相邻 2 个波峰及第 $(n + 1)$ 个波峰对应的时间值; A_1 、 A_{n+1} 分别为相隔 n 个周期的 2 个振幅。

2 结果与分析

2.1 单独主干的固有特性

表 3 为不加树冠时桦树主干的固有特性,其中主干 I 的固有频率 (32.16 Hz) 比主干 III 的固有频率 (19.51 Hz) 高 12.65 Hz。相反,主干 III 的阻尼比最大,为 0.12,比主干 I 的高 0.08。3 个主干的质量 (M) 分别为 0.21、0.30、0.44 kg,固有频率与 $1 + \sqrt{M}$ 之间呈现二次函数关系, r^2 为 1.000,其关系如图 4 所示。

表 3 主干的固有特性

主干	固有频率 (Hz)	阻尼比
I	32.16	0.04
II	27.57	0.06
III	19.51	0.12

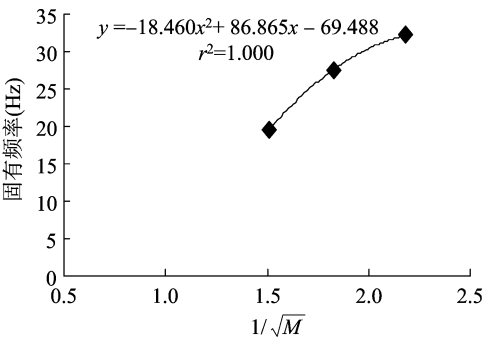


图4 固有频率与主干质量的关系

2.2 不同样品树的固有特性

2.2.1 固有频率 如表 4 所示,加上树叶后,样品树的固有频率呈现急剧下降的趋势。最小固有频率 (0.84、0.74、0.84 Hz) 出现在 2 号树冠条件下,最大固有频率 (2.56、2.76、2.51 Hz) 出现在 7 号树冠条件下,但是远低于 3 个单独主干的固有频率 (32.16、27.57、19.51 Hz)。此外,在同一主干的不同树冠条件下,最大固有频率低于 3.00 Hz,平均值仅为 1.40 Hz 左右。在同一树冠的不同主干条件下,固有频率的变化幅度为 0.01 ~ 0.50 Hz。主干 I、主干 II、主干 III 底部均被固定在台虎钳上,而树

冠可以自由摆动,因此树冠对样品树的质量分布具有显著影响,能够快速降低其固有频率。3 个主干的质量(M)分别为 0.21、0.30、0.44 kg,树冠去叶前

质量(m_1)的范围为 0.14 ~ 1.78 kg,固有频率与 $1/\sqrt{M+m_1}$ 之间仍然呈现二次函数的关系, r^2 分别达到 0.939、0.913、0.904,其关系如图 5 所示。

表 4 样品树的固有频率

样品树	主干	树冠固有频率(Hz)									
		1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	8 号	9 号	10 号
带叶	I	1.02	0.84	1.05	0.89	1.16	0.99	2.56	2.55	1.93	1.08
	II	1.14	0.74	1.23	1.38	1.03	1.01	2.76	2.42	1.92	0.95
	III	1.02	0.84	1.05	0.89	1.16	0.99	2.51	2.44	1.93	1.21
去叶	I	1.46	1.15	2.46	2.02	1.78	1.84	3.86	2.99	3.15	1.94
	II	1.67	1.63	2.37	1.92	1.82	1.84	3.67	3.24	3.09	2.05
	III	1.76	1.41	2.55	2.06	1.74	1.83	3.54	3.15	3.17	2.30

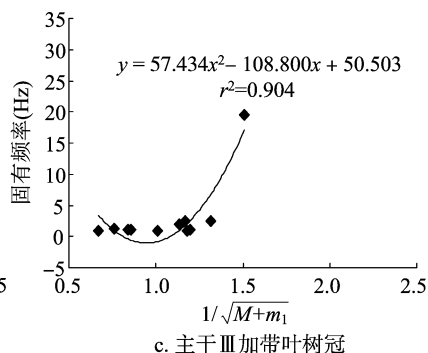
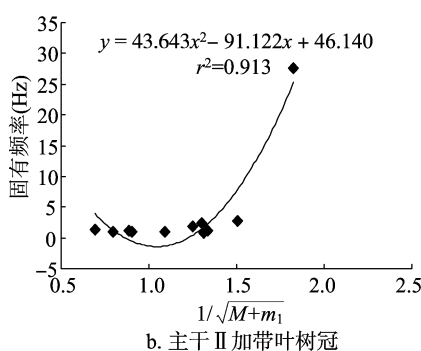
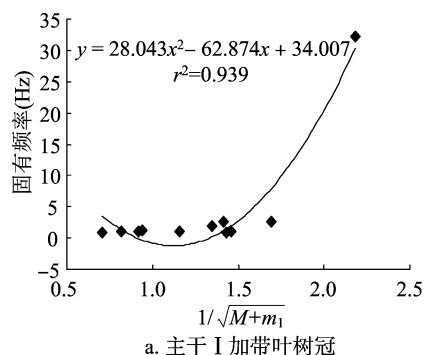


图5 固有频率与带叶样品树总质量的关系

与带叶样品树相比,当树冠去除叶片以后,样品树的固有频率呈现出上升的趋势。最小固有频率(1.15、1.63、1.41 Hz)仍出现在 2 号去叶树冠条件下,比带叶树冠条件下增加了 0.50 Hz 左右。最大固有频率(3.86、3.67、3.54 Hz)出现在 7 号去叶树冠条件下,分别比带叶树冠条件下增加了 1.30、0.91、1.03 Hz。总体来说,在去叶条件下,样品树固

有频率的最大增幅仅为 1.50 Hz,因此可见叶片质量对树固有频率的影响并不明显。树冠去叶后的质量(m_2)为 0.05 ~ 1.13 kg,不同于单独主干、带叶样品树,其固有频率与 $1/\sqrt{M+m_2}$ 之间存在三次函数关系, r^2 分别达到 0.929、0.912、0.901,其关系如图 6 所示。

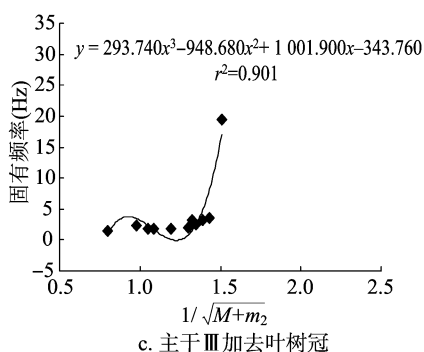
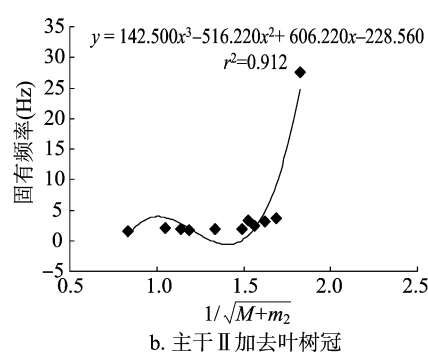
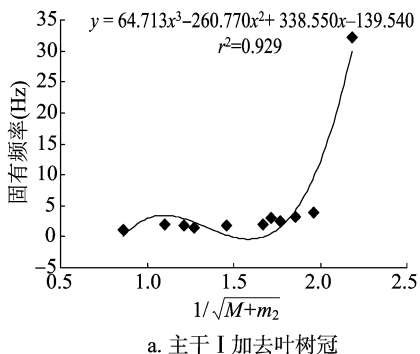


图6 固有频率与去叶样品树总质量的关系

2.2.2.2 阻尼比 如表 5 所示,在树冠带叶条件下,样品树的阻尼比整体上没有太大变化。最大阻尼比(0.18、0.17、0.19)出现在 3 号树冠条件下,与单独主干条件下的 0.04、0.06、0.12 相比分别增加了

0.14、0.11、0.07。最小阻尼比(0.08、0.06、0.08)出现在 2 号树冠条件下,接近于单独主干的阻尼比。因此可见,树冠结构并没有显著改变样品树的阻尼比。此外,在同一主干不同树冠条件下,阻尼比的

表 5 样品树的阻尼比

样品树	主干	树冠阻尼比									
		1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	8 号	9 号	10 号
带叶	I	0.09	0.08	0.18	0.14	0.11	0.13	0.07	0.08	0.11	0.13
	II	0.07	0.06	0.17	0.14	0.12	0.14	0.06	0.09	0.11	0.14
	III	0.09	0.08	0.19	0.14	0.13	0.15	0.09	0.11	0.14	0.15
去叶	I	0.03	0.04	0.05	0.03	0.02	0.04	0.05	0.04	0.07	0.03
	II	0.03	0.04	0.06	0.04	0.02	0.05	0.05	0.03	0.06	0.03
	III	0.04	0.04	0.06	0.04	0.03	0.06	0.05	0.04	0.07	0.04

最大变化幅度不到 0.20,在同一树冠不同主干条件下,阻尼比的最大变化幅度不到 0.03。

在树冠去叶条件下,样品树的阻尼比呈现整体下降的趋势,最大值(0.07、0.06、0.07)出现在 9 号树冠条件下,最小值(0.02、0.02、0.03)出现在 5 号树冠条件下。在不同树冠条件下,主干 I、主干 II、主干 III 的平均阻尼比分别为 0.04、0.04、0.05,与带叶树冠条件下的平均阻尼比最大相差 0.07。本试

验选用的 10 个树冠的叶片总面积为 16 924 ~ 83 188 cm²,在去叶条件下新构成的样品树阻尼比相差不大,因此可见叶片引起的空气阻尼对样品树的影响较小。

2.3 室外试验

分别于 2020 年 8 月、12 月对南京林业大学校园内的 3 株银杏树进行固有特性测试,详见图 7、图 8。银杏树的具体尺寸特征参数见表 6。



a. 带叶银杏 1 b. 带叶银杏 2 c. 带叶银杏 3

图7 8 月的带叶银杏树



a. 去叶银杏 1 b. 去叶银杏 2 c. 去叶银杏 3

图8 12 月的去叶银杏树

表 6 银杏树的形态参数

树种	直径 (cm)	树高 (cm)	树干高度 (cm)	冠幅 (cm)
银杏 1	8.29	475	212	320
银杏 2	9.35	600	223	250
银杏 3	13.50	650	255	400

如表 7 所示,8 月的带叶银杏树的固有频率均不到 1.00 Hz,最大阻尼比仅为 0.09。其中银杏树 3 的直径、高度和冠幅均最大,而固有频率、阻尼比均出现最小值。12 月的去叶银杏树的固有频率比 8 月有所提高,最大增幅为银杏 1(0.37 Hz)。与室内试验类似,去叶后银杏树的阻尼比仅比带叶条件下减小了 0.03。由此可见,冬季环境下树木主要还是依靠树枝来耗散能量,树叶对树木固有特性的影响小于树枝对树木固有特性的影响^[21-22]。

表 7 银杏树的固有特性

序号	8 月的带叶银杏树		12 月的去叶银杏树	
	固有频率 (Hz)	阻尼比	固有频率 (Hz)	阻尼比
1	0.98	0.09	1.35	0.06
2	0.77	0.07	0.99	0.05
3	0.82	0.05	1.07	0.03

3 结论

本研究在室内选择 3 个主干和 10 个树冠构成新的样品树,采用绳拉法测试了其固有特性,同时在室外进行试验验证,得出以下结论:(1)单独主干的固有频率与 $1/\sqrt{M}$ 之间存在二次函数关系。(2)树冠对样品树的质量分布具有明显影响,能够快速降低其固有频率,但是对阻尼比的影响较小。固有频率与 $1/\sqrt{M+m_2}$ 之间仍然存在二次函数的关系。(3)叶片质量对样品树固有频率的影响并不明显,与单独主干、带叶样品树不同,固有频率与 $1/\sqrt{M+m_2}$ 之间存在三次函数的关系。

参考文献:

- [1] 汤昌海,周建中,崔云静. 树木风振机理研究综述[J]. 世界林研究,2009,22(5):57-61.
- [2] 刘 斌. 振动式林果采收机的机械化试验研究[J]. 农机化研究,2019,41(5):163-167.
- [3] 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.
- [4] 汤昌海. 新疆杨风致减振机理的基础研究[D]. 北京:北京林业

大学,2010.

- [5] SELLER D, FOURCAUD T. Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds[J]. American Journal of Botany,2009,96(5):885-896.
- [6] SPATZ H C, THECKES B. Oscillation damping in trees[J]. Plant Science,2013,207(6):66-71.
- [7] MURPHY K D, RUDNICKI M. A physics-based link model for tree vibration[J]. American Journal of Botany,2012,99(12):1918-1929.
- [8] PELTOLA H. Swaying of trees in response to wind and thinning in a stand of Scots pine[J]. Boundary-Layer Meteorology,1996,77(3):285-304.
- [9] FOURCAUD T, ZHANG X, STOKES A, et al. Plant growth modeling and applications: The increasing importance of plant architecture in growth models[J]. Annals of Botany,2008,101(8):1053-1063.
- [10] BAKER C J. Measurements of the natural frequencies of trees[J]. Journal of Experimental Botany,1997,48(5):1125-1132.
- [11] JONSSON M J, FOETZKI A, KALBERER M, et al. Natural frequencies and damping ratios of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst] growing on subalpine forested slopes[J]. Trees Physiology,2007,21(5):541-548.
- [12] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of structures[M]. 3rd ed. Berkeley: Computers & Structures, Inc., 1995.
- [13] MILNE R. Dynamics of swaying of *Picea sitchensis* [J]. Tree Physiology,1991,9(3):383-399.
- [14] 万志兵,李秀芹,刘成功,等. 不同发育阶段檫木人工林树高、胸径与树冠结构关系的动态关系分析[J]. 基因组学与应用生物学,2017,36(4):331-339.
- [15] 涂宏涛,孙玉军,吴明钦,等. 杉木人工林树冠表面积及体积模型的研究[J]. 中南林业科技大学学报,2015,35(9):88-92.
- [16] TOBIAS K, BARRY G. A mathematical model to describe the dynamic response of a spruce tree to the wind[J]. Trees,1998,12(6):385-394.
- [17] MOORE J R, MAGUIRE D A. Natural sway frequencies and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies[J]. Trees Physiology,2004,18(2):195-203.
- [18] MOORE J R, MAGUIRE D A. Natural sway frequencies and damping ratios of trees: influence of crown structure[J]. Trees Physiology,2005,19(4):363-373.
- [19] MOORE J R, MAGUIRE D A. Simulating the dynamic behavior of Douglas-fir trees under applied synthesis of previous studies[J]. Trees Physiology,2008,28(1):75-83.
- [20] 林 欢,许林云,宣 言,等. 基于物理杆的多级 Y 型银杏树动力学建模及试验[J]. 林业工程学报,2020,5(3):121-129.
- [21] SPATZ H C, BRUCHERT F, PFISTERER J. Multiple resonance damping or how do trees escape dangerously large oscillations[J]. American Journal of Botany,2007,94(10):1603-1611.
- [22] RODRIGUEZ M, DE LANGRE E, MOULIA B. A scaling law for the effects of architecture and allometry on tree vibration modes suggests a biological tuning to modal compartmentalization[J]. American Journal of Botany,2008,95(12):1523-1537.