

【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

基于激光扫描和形貌等效的行道树风荷载模拟

孙梦思¹, 周晓青¹, 黄希桂², 蔡鸣¹, 崔冬瑾³, 李伟文¹, 李利孝^{1,4}

1) 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060; 2) 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东深圳 518055;
3) 深圳大学建筑与城市规划学院, 广东深圳 508060; 4) 深圳市海上基础设施安全与监测重点实验室, 广东深圳 518060

摘要: 行道树风荷载的准确模拟是对其开展风致失效模式分析以及加固处置的先决条件。为精确模拟行道树的风荷载, 提出一种基于三维(three dimensional, 3D)激光扫描与树冠形貌等效融合的典型行道树风荷载数值模拟方法, 对典型行道树的风致失效模式进行了探讨。首先通过移动式3D激光扫描建立山茶树和南洋楹两种行道树的点云模型, 并采用树冠形貌等效方法构建了两棵行道树数值分析模型; 然后探讨等效建模方法中模型尺寸随风速变化的折减规律; 最后分析行道树模型在不同等级风速作用下的风振响应特性和失效模式。研究表明, 基于3D激光扫描和树冠形貌等效的行道树风荷载模拟方法可准确模拟行道树风荷载特性, 行道树顺风向阻力模拟值与试验值的误差在5%以内; 树木破坏形态以弯曲破坏为主, 且树木各级枝干初始破坏呈现出3级枝条、2级枝条、1级枝条和主干的顺序特征, 但在风速较大时则出现主干或重要枝干破坏先于次要枝干的现象。本研究提出的树冠形貌等效的行道树风荷载模拟方法精确性良好, 对城市行道树风致易损性分析以及城市绿化系统的防灾减灾规划具有重要指导意义。

关键词: 结构工程; 风荷载; 行道树; 形貌等效; 有限元模拟; 失效模式; 风振响应

中图分类号: TU312

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2024.02127

Simulation of wind load on street trees based on laser scanning and crown morphological equivalence

SUN Mengsi¹, ZHOU Xiaoqing¹, HUANG Xigui², CAI Ming¹, CUI Dongjin³,
LI Weiwen¹, and LI Lixiao^{1,4}

1) College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

2) School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen, Shenzhen 518055,
Guangdong Province, P. R. China

3) School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

4) Shenzhen Key Laboratory of Structure Safety and Health Monitoring of Marine Infrastructures, Shenzhen 518060,
Guangdong Province, P. R. China

Abstract: Accurate simulation of wind loads on street trees is a prerequisite for analyzing wind-induced failure modes and implementing reinforcement treatments. In order to precisely simulate the wind loads on street trees, we propose a numerical simulation method for wind loads on typical street trees based on the equivalent fusion of 3D laser scanning and tree crown morphology, and discuss the wind-induced failure modes of typical street trees. Firstly, the point cloud models of the Camellia and Jacaranda street trees are established through mobile 3D laser scanning,

Received: 2023-05-30; **Accepted:** 2023-10-19; **Online (CNKI):** 2024-01-26

Foundation: National Natural Science Foundation of China (52178491); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2021A1515011769, 2022A1515011499); Natural Science Foundation of Shenzhen (JCYJ 20210324093809023)

Corresponding author: Associate professor LI Lixiao (lilixiao@szu.edu.cn)

Citation: SUN Mengsi, ZHOU Xiaoqing, HUANG Xigui, et al. Simulation of wind load on street trees based on laser scanning and crown morphological equivalence [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2024, 41(2): 127-135. (in Chinese)



<http://journal.szu.edu.cn>

and the numerical analysis model of the street trees is constructed by applying the morphological equivalence principle for the crown part. Next, the reduction pattern of model size with different wind speeds in equivalent modeling method is explored. Finally, the wind vibration response characteristics and failure modes of the street tree model under different wind speeds are discussed. The results indicate that the wind load simulation method of street trees based on the 3D laser scanning and crown morphology equivalence can accurately simulate the wind load characteristics of street trees, with an error between the simulated and experimental values of downwind resistance of street trees less than 5%. The predominant damage pattern of trees is mainly bending deformation, and the initial damage of branches at all levels of trees presents the sequence characteristics of tertiary branch, secondary branch, primary branch and trunk. However, when the wind speed is high, the damage of trunk or important branches precedes that of secondary branches. The proposed method for simulating wind loads on street trees with equivalent crown morphology is accurate and has important guiding significance for analysis of wind-induced vulnerability of urban street trees and disaster prevention and mitigation planning of urban greenery systems.

Key words: structural engineering; wind load; street tree; morphological equivalence; finite element simulation; failure mode; wind response

随着城市对绿色低碳生态环境需求的持续增加, 承担城市绿化功能的行道树栽种数量和种类在不断增多^[1-3], 成为了城市设施系统的重要组成部分. 行道树属于风致易损物, 每年由台风引发的行道树断枝与倒伏所导致的次生灾害, 对城市居民的生命和财产安全造成巨大威胁, 经济损失达数亿至数十亿元^[4-5]. 因此, 准确评估行道树的风荷载特征及其在风荷载作用下的响应特性和破坏模式对城市绿化系统的防灾减灾规划具有重要指导意义.

为了刻画树木在风荷载作用下的动力响应特性, 风工程领域和林学领域的专家学者针对树木的动力学分析展开了广泛的研究探索. BAKER^[6]将树木简化成由一根杆连接的两个质量点, 通过理论推导首次建立了树木风灾评估模型. SAUNDERSON等^[7]在 Baker 模型的基础上, 考虑树叶和树枝对风效应的影响, 将树干视为悬臂梁、树叶和树枝视为附加质量, 采用频域分析方法估算出了树木倒伏的失效风速. GARDINER 等^[8]通过对大量实验数据进行统计分析, 拟合了预测树木最大弯矩的经验公式, 发现其主要与树干直径、锥度等有关. JAMES 等^[9]发现树枝质量提供的动态阻尼减少了主干振动的最大幅值, 降低了树木倒伏的风险, 并揭示了树木的复杂动力学行为, 同时从能量传递的角度解释了树木的风损机理. 关德新等^[10]通过风洞实验确立了树冠处风场特征, 并展开树冠结构参数的研究. 徐志^[11]基于 Realizable 模型算法, 采用附加源项法模拟树冠层, 研究了不同树冠层对尾流风场的影响. 李正农等^[12]利用多松弛格子 Boltzmann 模型对树木最大风速位置进行了预测, 并通过风洞试验揭

示了树木间风荷载与流场特性^[13]. 崔云静^[14]根据风压和风速的关系计算了树木在不同高度处的风压并推导了新疆杨树木的响应功率谱. 李正农等^[15]采用图像处理方法对树木的疏透度进行了研究, 为不同风速下树冠形态变化的模型建立提供了方向.

综上所述, 树木因形态各异, 结构复杂, 受外界因素影响较大, 建立合适的树木力学模型, 是树木风致灾害研究领域的重大挑战之一. 基于此, 本研究以山茶树和深圳市典型的行道树南洋楹为研究对象, 提出在枝干上添加球体以模拟树冠风效应的球体树冠模型, 建立树木的有限元模型, 并对该模拟方法的有效性进行了验证, 探讨行道树在不同等级风速作用下的风振响应特性和破坏模式.

1 行道树风荷载模拟方法

树木力学性能分析的建模方法大致分为两类: 一类是构建考虑树木结构顶端位移和根部弯矩等关键参数的静力学或动力学控制方程; 另一类是建立树木的精细化有限元分析模型^[16]. 基于动力学控制模型的行道树风振响应分析时, 风荷载作为已知量输入结构模型中, 但是目前对行道树风荷载的准确评估却存在较大挑战; 基于精细有限元分析模型的行道树风振流固耦合分析时, 如何表征树冠复杂结构与形貌特征, 以及树冠形貌随风速的变化情况是关键难点. 基于此, 本研究探索一种基于树冠形貌等效的行道树风振响应流固耦合模拟方法.

行道树具有树干和树冠结构分明、枝干层次清晰的特点. 在行道树的有限元分析模型中, 将树干

简化为主干、1级枝条、2级枝条和3级枝条, 不考虑树木的初始倾斜和位移影响^[17], 同时假定主干根部与地面固结。何定颖等^[1]研究表明行道树树冠在风荷载作用下其迎风面积呈减小趋势、疏透度呈增加趋势, 这种树冠形貌的改变将对其空气动力学特

性产生显著影响。本研究针对典型行道树的风荷载模拟, 提出一种基于三维(three dimensional, 3D)激光扫描和树冠形貌等效相结合的行道树风荷载模拟方法, 充分考虑了树冠对行道树风荷载的影响。模拟过程如图1。

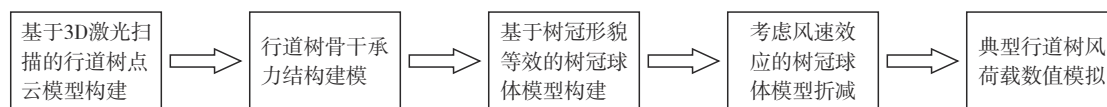


图1 行道树风荷载模拟过程

Fig. 1 Street trees wind load simulation process.

1.1 基于3D激光扫描的行道树点云模型构建

随着树龄的增加, 行道树枝干体系通常极为复杂, 且各级枝干形貌各异。因此, 如何相对精确地构建典型行道树的有限元分析模型是对其开展力学性能分析和破坏分析的关键所在。传统的行道树信息获取主要以人工测量为主, 采用卷尺、齿轮和测高仪等, 工作耗时长、效率低。三维激光扫描技术又被称为实景复制技术^[18], 主要是利用激光反射的原理进行距离测量, 目前已被广泛应用于地形测绘和建筑物形变监测等, 少量学者尝试着将其应用于行道树三维信息的获取^[19-20]。

为精确获取行道树的基本形貌参数信息并构建其精细有限元模型, 本研究利用三维激光扫描技术获取行道树的点云模型。使用GeoSLAM手持激光扫描仪, 对中国深圳大学校园内行道树进行点云数据的采集。具体扫描建模如下:

1) 以单棵树为中心, 围绕树木周边由远及近的扫描方式, 从全方位多角度进行扫描, 尽可能获取完整的点云数据。在具体实践中由于缺少了俯视角度的数据, 导致树木顶端的细部枝叶相对稀疏, 但已经满足本研究对主要枝干建模的需求, 行道树模型可扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图S1。

2) 将行道树的点云数据进行解析, 使用cloud compare点云后处理软件对周边的干扰物进行切割降噪处理, 以主干中心为原点对目标激光点云数据进行坐标换算, 提取主要枝干中心的点云坐标。

1.2 基于树冠形貌等效的行道树有限元模型构建

行道树通常枝繁叶茂, 4级及以上枝条刚度较低, 在风荷载等外力作用下会发生显著的弯曲变形。有限元建模时由于计算资源的限制, 目前难以考虑到4级及以上枝条和树叶等的影响。本研究提出一种采用球体面积等代的行道树树冠形貌等效方

法来模拟树冠风荷载, 具体实现途径为:

1) 基于行道树的点云数据模型, 利用UG软件的样条曲线和扫描等功能建立行道树的主要树干(包括主干与1、2、3级枝干)的模型;

2) 针对行道树的树冠4级及以上枝叶部分, 采用Photoshop软件处理照片, 拾取树木枝干的几何参数, 计算出树冠占用的像素值, 然后结合主要枝干的数量和形态, 在3级枝干的重心处建立等效树冠面积的球体, 以模拟树冠形态。

1.3 考虑风速影响下的等效球体折减方法

基于前述树冠形貌等效原则可构建球体等效的行道树主体结构。但在现实环境中行道树的树冠迎风面积会随着风速发生改变, 通常当风速增加时, 树冠迎风面积呈减小趋势, 疏透度呈增加趋势^[1]。因此, 采用球体等代的树冠形貌等效模拟方法需要考虑风速改变对树冠的影响, 即等效球体直径需随着风速的改变而调整, 进而相对准确的表征行道树的真实风荷载状况。为了建立树冠形貌等效的等效球体直径与风速之间的变化关系, 本研究根据文献[21]的风洞试验数据, 通过计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟的方法构建等效球体直径与来流风速之间的关系。

针对文献[21]中山茶树缩尺模型, 利用UG建模软件建立其主要枝干模型, 结合主要枝干的数量和形态, 将枝叶端分成8个部分, 在树冠面积的重心处建立等效树冠面积的球体, 以模拟树冠形貌。山茶树的分析模型请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图S2。

图2为山茶树缩尺模型的计算域和模型网络。其中, 模型高度 H 为0.42 m, 投影面积为0.048 m², 阻塞率为0.2%; 计算流场域的网格数量为280万个, 附面层设置为10层六面体网格, 其余网格为四面体网格, 最大扭曲度为0.71; 底部定义为壁

面边界,两个侧面及顶面定义为对称边界,树木壁面设置为光滑无滑移壁面;采用Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型,压力与弯矩采用二阶迎风格式,时间步长设

置为0.01 s,计算时间控制为5 s,其他参数保持默认设置.

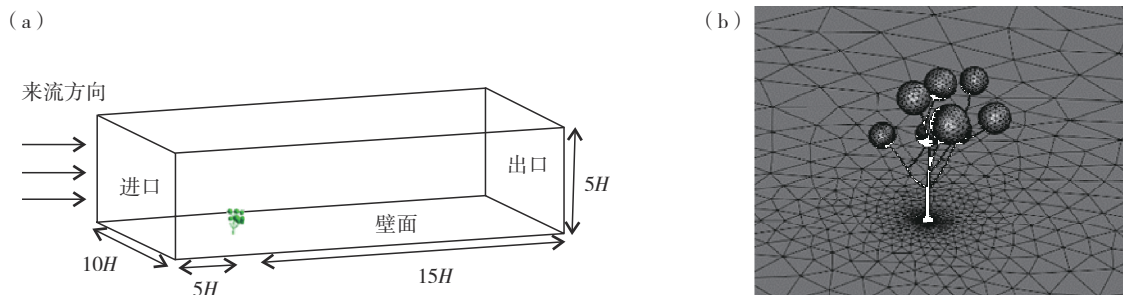


图2 山茶树缩尺模型的(a)计算域和(b)模型网格

Fig. 2 (a) Computational domain and (b) model grid of Camellia scale model.

将山茶树无风或微风状态下树冠形貌等效换算得球体半径定义为 r_0 ,将不同风速下CFD模拟的山茶树基底阻力与风洞试验值相同时的球体半径定义为 r_i ,无量纲系数 r_i/r_0 用来表征球体树冠尺寸的折减.

图3(a)为CFD数值模拟达到与风洞试验相同的顺风向阻力时, r_i/r_0 与风速的变化关系.由图3(a)可见,在入口风速 $v < 14$ m/s时, $r_i/r_0 > 1$,这主要是由于等代球体具有较好的流线型,风阻力较小所致;当 v 介于(14~24) m/s间时, $r_i/r_0 < 1$,表明风速较大时需对等代球体半径进行折减,以考虑真实树冠迎风面减小的影响.整体上风速处于(5~

24) m/s内时, r_i/r_0 与风速具有良好的线性关系,但当 $v > 24$ m/s时, r_i/r_0 不再随风速的增大而变化.这主要是由于在较大风速下,树木冠形逐渐收缩至流线形,疏透度也不会继续增加,迎风面积趋于稳定.基于 r_i/r_0 与风速的关系,采用最小二乘法可拟合得

$$r_i/r_0 = \begin{cases} -0.0225v + 1.3085, & v < 24 \text{ m/s} \\ 0.7685, & v \geq 24 \text{ m/s} \end{cases} \quad (1)$$

在模拟过程中,同时监测树木阻力随风速的变化关系,如图3(b),树木阻力的斜率随着风速的增加亦呈逐渐增大趋势,在风速达到24 m/s后,树木阻力随着风速的增加呈逐渐减少趋势,表明此时树木迎风面积折减到达临界值.

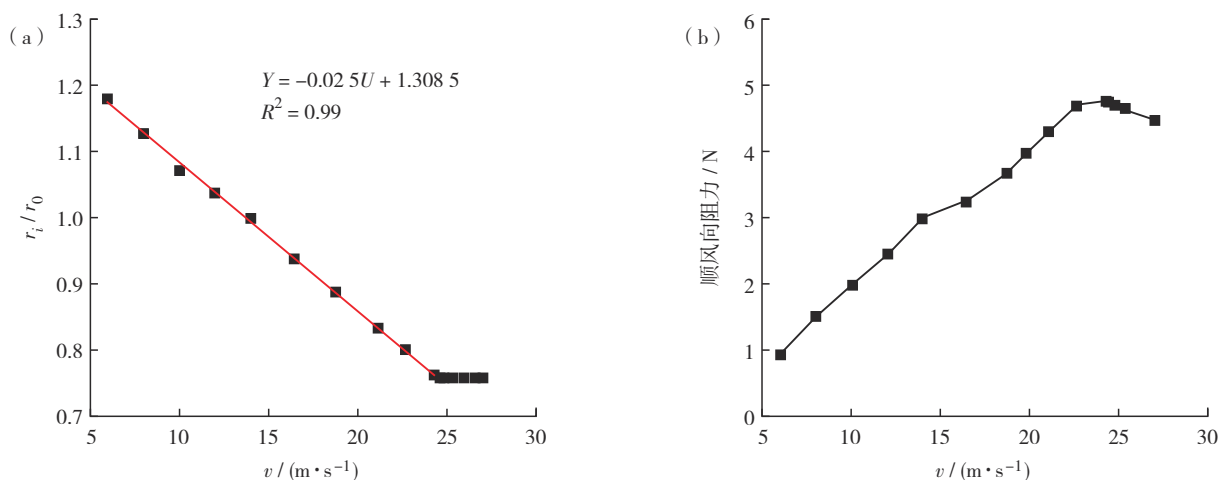


图3 (a)球体半径比和(b)顺风向阻力与风速的关系

Fig. 3 Relationship of (a) sphere radius ratio and (b) downwind resistance to wind speed.

1.4 模拟方法有效性验证

为验证行道树风荷载模拟方法的有效性,本研究将建立上述山茶树的足尺球体等代树冠形貌等效

数值分析模型,通过计算流体动力学分析软件CFD,模拟足尺山茶树在不同风速下的阻力系数,并与风洞试验结果进行对比.阻力系数 C_D 为

$$C_D = \frac{2F_D}{v^2 A} \quad (2)$$

其中, F_D 是树木顺风向受到的阻力; A 是迎风面投影面积。

足尺山茶树数值分析模型的建模采用1.2节所提出的建模方法。根据文献[21]给出的几何缩尺比, 获得足尺山茶树模型的高度 H 为 8.4 m, 投影面积为 0.96 m²; 采用式(1)的等代球体半径与风速的折减关系对等代球体半径进行折减。根据风洞试验的风速缩尺比 1:2 换算得到足尺模型的模拟风速后, 通过 CFD 数值模拟得到不同风速下山茶树的阻力系数, 如表 1。表 1 同时还给出了山茶树模型风洞试验在不同风速下的阻力系数值以及模拟误差。从表 1 可见, 足尺模型的阻力系数模拟值在各自对应的风速下都略小于阻力系数试验值; 随着风速的增加, 误差呈逐渐减少的趋势, 在较高风速下阻力系数的误差均小于 5%, 当风速达到 52 m/s 时, 阻力系数的误差仅为 1.75%, 满足精度要求。综上所述可见, 本研究提出的基于球体等代的树冠形貌等效的行道树风荷载模拟方法可以有效的模拟行道树在各级风速作用下的风荷载。

表1 阻力系数的对比

Table 1 Comparison of drag coefficients

试验风速/ (m·s ⁻¹)	对应足尺风 速/(m·s ⁻¹)	阻力系数		误差/ %
		CFD 数值模拟	风洞试验	
6	12	0.914	0.981	6.83
10	20	0.833	0.882	5.56
14	28	0.798	0.823	3.04
18	36	0.764	0.793	3.66
22	44	0.730	0.764	4.45
26	52	0.728	0.741	1.75

2 南洋楹行道树风荷载模拟及风致失效模式分析

2.1 计算流场与网格的划分

以南洋楹行道树模型为例, 树高为 18.5 m, 树冠球体面积为 38.56 m²。本研究计算域长×宽×高为 18H×8H×5H, 计算阻塞率满足小于 5% 的限值。计算域在 ANSYS Fluent Flow 的 Geometry 模块建立, 使用布尔操作将实体树木从流体中抽取出来并抑制实体树木, 留下树木外表壁面, 从而便于划

分流体网格。

数值计算统一采用压力耦合方程组的半隐式算法 (semi-implicit method for pressure linked equations, SIMPLEC) 对速度-压力耦合求解, 采用速度入口和自由流出口; 行道树及其周围被视为无滑移壁面, 而与风场相接触的表面定义为流固耦合面。在树木壁面设置了 10 层膨胀层加密网格, 网格扭曲度限定在 0.7 以内, 保障网格质量, 使得风荷载能够高精度施加和传递。流场计算时长为 10 s, 时间步长为 0.01 s, 收敛精度为 0.001 s, 每步迭代 20 次, 其余参数设置同上。

2.2 南洋楹风荷载模拟

根据文献[17]的研究, 行道树的破坏通常包括弯曲性和剪切型两种破坏形式, 当模型单元的弯矩超过其抗弯承载力则定义为弯曲破坏。单元截面的极值弯矩为

$$M_i = \frac{\pi}{32} f_{\text{knot}} \sigma_{\text{max}} D_i^3 \quad (3)$$

其中, f_{knot} 为木材强度折减系数, 一般取值为 0.85; σ_{max} 为木材顺纹抗压强度, 针对南洋楹其取值为 2.88×10^7 Pa; D_i 是截面直径。

南洋楹的主干、1 级枝条、2 级枝条和 3 级枝条直径分别为 0.42、0.29、0.25 和 0.11 m, 则其极值弯矩分别为 224、81、22 和 4 kN·m。树木在受到风荷载作用时, 除了发生弯曲破坏外, 也可能发生剪切破坏^[17]。参考洪成器等^[22]对 9 a 生南洋楹的力学性能的测试结果, 将材料标准强度的 85% 定义为其极限值, 可折算出树木主干的最大剪切应力为 8.2 MPa。其余各级枝条的强度根据文献[17]进行折减, 即 1 级枝条强度取为主干强度的 80%, 2 级枝条取为 1 级枝条强度的 70%, 3 级枝条取为 2 级枝条的 60%^[18]。表 2 为南洋楹主要枝条在不同风速下的弯矩和剪应力。

根据文献[17]的定义, 将树干在风荷载作用下的平均应力与其相应临界应力强度的比值定义为破坏系数。图 4 为行道树主要枝干的弯曲破坏系数和剪切破坏系数与风速的关系。由图 4 可见, 弯矩破坏系数和剪切破坏系数均随着风速的增大而增大, 且主干、1 级枝条、2 级枝条和 3 级枝条的剪切破坏系数显著小于弯矩破坏系数, 表明弯曲破坏是南洋楹主要破坏形式, 剪切破坏次之, 与已有研究结论较为一致^[23]。

2.3 行道树失效风速分析和破坏模式分析

本研究拟采用荷载增量法计算不同风向角(0°

表2 南洋楹主要枝条弯矩和剪应力与风速的关系

Table 2 Relationship between bending moment and shear stress of main branches of Jacaranda with wind speed

$v /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	主干(Branch-0)		1级枝条(Branch-1)		2级枝条(Branch-11)		3级枝条(Branch-111)	
	弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	剪应力/ MPa	弯矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	剪应力/ MPa	弯矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	剪应力/ MPa	弯矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	剪应力/ MPa
16	46.55	0.13	18.67	0.49	5.48	0.15	0.89	0.83
20	75.49	0.16	28.36	0.56	8.55	0.21	1.28	0.94
24	87.53	0.21	32.6	0.85	9.79	0.35	1.69	1.68
28	119.19	0.25	45.66	1.26	14.20	0.42	2.05	1.98
32	158.31	0.29	51.61	1.85	16.15	0.56	2.45	2.56
36	171.64	0.32	63.10	2.31	18.78	0.61	2.75	2.95
40	193.37	0.52	69.41	3.40	19.56	0.82	2.98	3.22
44	224.26	0.85	81.25	4.01	22.36	1.24	3.52	3.52

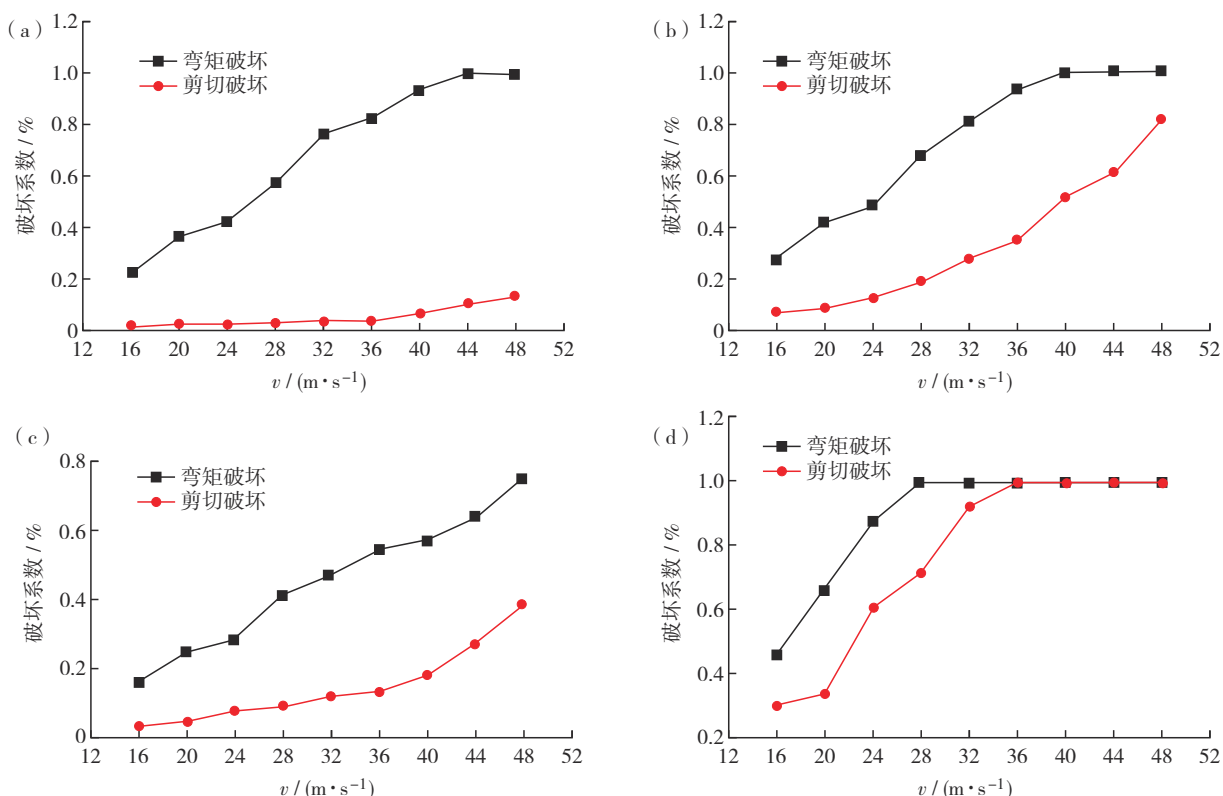


图4 行道树枝干弯矩和剪切破坏的破坏系数与风速的关系 (a)主干(branch-0); (b)1级枝条(branch-1); (c)2级枝条(branch-11); (d)3级枝条(branch-111)

Fig. 4 Relationship between failure coefficient of tree branch and wind speed in bending failure (black line) and shear failure (red line) mode. (a) Trunk (branch-0), (b) primary branch (branch-1), (c) secondary branch (branch-11), and (d) tertiary branch (branch-111).

和 90°)下的行道树主干和各分枝的弯矩随着风速增大的变化情况,进而分析风向角对树木枝干破坏的影响,确定枝干的失效弯矩和枝干损失率,探讨行道树模型在不同等级风速作用下的风振响应特性和破坏模式,预测典型行道树主要枝干的失效风速和破坏模式.

由于行道树模型的底端为固定端约束,在风荷载的作用下,树木所受的荷载通过上部的枝干向下

传递,所以树木的最大弯矩出现在树根部位置.通过式(3)对每个枝条计算得到其弯矩承载力.基于弯矩承载力对不同风速等级下各级枝干的弯矩进行监测,结合弯矩破坏准则判定结构的失效风速.根据计算结果绘制了 0° 和 90° 风向角下南洋楹的各级枝干失效风速图,如图5(a)和(b).

由于迎风面的枝干需承受风荷载的直接作用,因此,图5(a)和(b)中 0° 和 90° 风向角行道树迎风面

枝干的破坏风速普遍小于背风面枝干的破坏风速. 在 0° 风向角时, 迎风面的枝干率先达到结构破坏风速, 与背风面的破坏风速相差较大; 而在 90° 风向

作用下, 两侧的破坏风速较为均匀, 且表现出更为良好的抗风性能. 树木整体在两个风向角下的迎风面积较为接近, 因此主干的破坏风速相同.

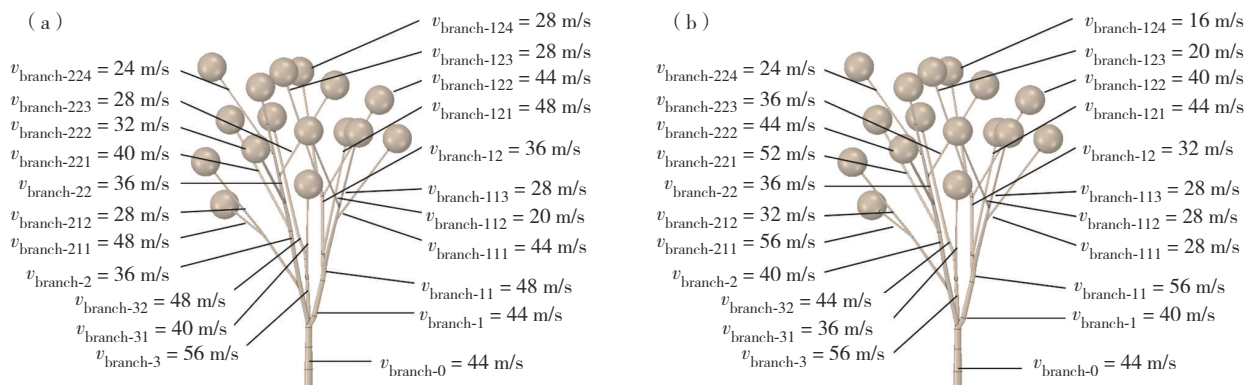


图5 (a) 0° 和(b) 90° 风向角南洋楹的各级分枝的失效风速

Fig. 5 Failure wind speed of different branches of Jacaranda at (a) 0° and (b) 90° wind direction. $U_{\text{branch-ijk}}$ represents the failure wind speed, where i, j , and k represent the primary, secondary, and tertiary branches respectively, and Branch-0 represents the main trunk.

将不同风速下南洋楹各级枝干破坏的数量与该级枝干总数量的比值定义为枝干的破坏率, 图6为南洋楹各级枝干在不同风速下的破坏率. 由图6(a)和(b)可见, 由于树木具有不对称的复杂三维形态特征, 在受到不同方向的来流时受力会产生较大差异, 因此不同风向下南洋楹枝干的破坏率存在较大的差别. 由图6(a)可知, 各级枝干的弯矩强度破坏率均随着风速的增大而增大, 但是各级枝干的初始破坏呈现了明显的先后顺序, 3级枝条最先出现破坏, 随后2级和1级枝条也逐渐达到了失效风速. 其中, 3级枝条的破坏曲线较为平缓, 逐步递增, 而1和2级枝条的出现多个破坏曲线平台, 是由于3

级枝条数量较多且强度较低, 随着风速的增加不断出现破坏, 而1和2级枝条虽然受力除了本身受到的荷载还有3级枝条传递下来的力, 但是其直径较大, 由式(3)可知, 树木的枝干的弯曲强度与其直径的三次方成正比, 导致1和2级枝条的强度大于3级枝条. 由图6(b)可知, 当风向角为 90° 时, 主干达到破坏风速, 1级和3级枝条仍有部分未发生破坏; 这是由于这些枝条的迎风面积偏小, 且受到障碍物的遮挡作用, 使得作用在其身上的荷载不足以达到其破坏强度. 该现象也符合真实环境中树木的风致破坏过程.

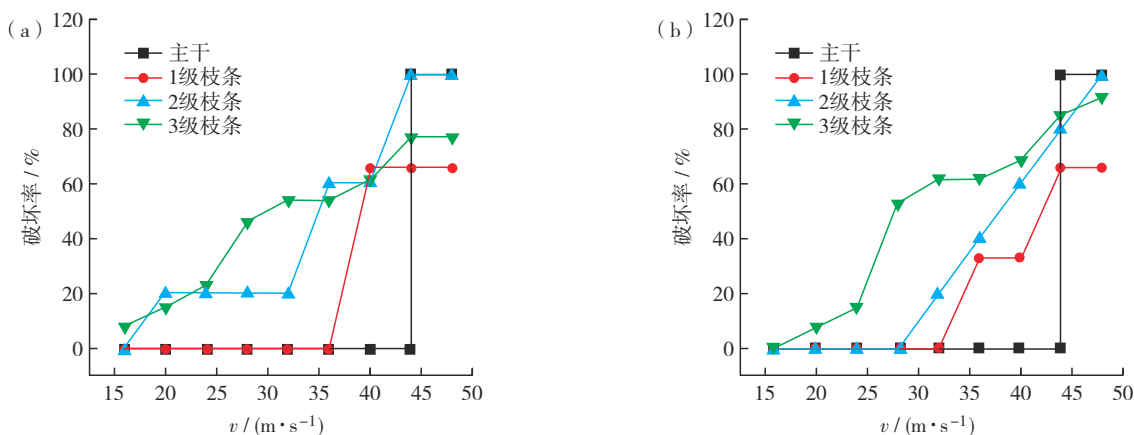


图6 (a) 0° 和(b) 90° 风向角不同风速下南洋楹枝干的破坏率

Fig. 6 Failure rate of different branches (main trunk, primary branch, secondary branch, tertiary branch corresponding to black line, red line, blue line, green line) of Jacaranda at (a) 0° and (b) 90° wind direction angles.

3 结 论

提出了一种基于 3D 激光扫描和树冠形貌等效的行道树风荷载数值模拟方法, 并基于山茶树的球体树冠模型, 拟合了考虑风速对树冠形貌影响的球体树冠面积随风速折减模型. 之后, 通过 CFD 模拟得到不同风速下的阻力系数, 与山茶树缩尺模型风洞试验的结果进行对比, 验证了仿球体树冠模型模拟方法的可靠性. 最后, 基于南洋楹的球体树冠模型, 探讨了行道树模型在不同等级风速作用下的风振响应特性和破坏模式, 可得:

1) 本研究提出的行道树球体树冠等效模型模拟方法可以较为准确地模拟行道树所受的风荷载, 模拟结果与风洞试验结果的误差在 5% 以内, 具有良好的精度;

2) 行道树的破坏以弯曲型破坏为主, 端部弯矩是评价行道树各级枝干破坏的主要指标; 迎风面枝干先于背风面枝干破坏, 且树木各级枝干的初始破坏存在 3 级枝条、2 级枝条、1 级枝条和主干的先后顺序, 但当风速较大的时候, 则会出现主干或重要枝干破坏先于次要枝干的特征.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178491); 广东省自然科学基金资助项目(2021A1515011769, 2022A1515011499); 深圳市自然科学基金资助项目(JCYJ202103240938 09023)

作者简介: 孙梦思(1592269103@qq.com), 深圳大学硕士研究生. 研究方向: 结构风工程.

引 文: 孙梦思, 周晓青, 黄希桂, 等. 基于激光扫描和形貌等效的行道树风荷载模拟[J]. 深圳大学学报理工版, 2024, 41(2): 127-135.

参考文献 / References:

- [1] 何定颖, 李正农. 行道树风致响应的风洞试验研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(3): 44-53.
HE Dingying, LI Zhengnong. Wind tunnel test on wind-induced responses of roadside trees [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(3): 44-53. (in Chinese)
- [2] 张德顺, 曾明璇, 奉树成, 等. 我国沿海地区城市行道树抗台风评价与应用[J]. 中国城市林业, 2022, 20(5): 151-156, 162.
ZHANG Deshun, ZENG Mingxuan, FENG Shucheng, et al. Evaluation and application of typhoon resilient urban street trees in coastal cities of China [J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2022, 20(5): 151-156, 162. (in Chinese)
- [3] 蒋应红. 国内外城市行道树综述[J]. 中国市政工程, 2020(6): 4-6.
JIANG Yinghong. A summary of urban street trees at home & abroad [J]. China Municipal Engineering, 2020 (6): 4-6. (in Chinese)
- [4] 包文轩, 宫阿都, 徐灏, 等. 基于区域灾害系统论的广东省台风灾害风险评估——以“山竹”台风为例[J]. 北京师范大学学报自然科学版, 2023, 59(1): 94-103.
BAO Wenxuan, GONG Adou, XU Can, et al. Typhoon disaster risk assessment in Guangdong province by regional disaster system theory: case of "Mangkhut" [J]. Journal of Beijing Normal University Natural Science, 2023, 59(1): 94-103. (in Chinese)
- [5] 周利芬, 吴红华, 李正农. 树木抗风及对风环境影响的研究综述[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 199-206.
ZHOU Lifan, WU Honghua, LI Zhengnong. Review of research on trees' wind resistance and effects on wind environment [J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(5): 199-206. (in Chinese)
- [6] BAKER C J. The development of a theoretical model for the windthrow of plants [J]. Journal of Theoretical Biology, 1995, 175(3): 355-372.
- [7] SAUNDERSON S E T, ENGLAND A H, BAKER C J. A dynamic model of the behaviour of Sitka spruce in high winds [J]. Journal of Theoretical Biology, 1999, 200(3): 249-259.
- [8] GARDINER B, PELTOLA H, KELLOMÄKI S. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees [J]. Ecological Modelling, 2000, 129(1): 1-23.
- [9] JAMES K R, HARITOS N, ADES P K. Mechanical stability of trees under dynamic loads [J]. American Journal of Botany, 2006, 93(10): 1522-1530.
- [10] 关德新, 朱廷曜. 树冠结构参数及附近风场特征的风洞模拟研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 202-204.
GUAN Dexin, ZHU Tingyao. Wind tunnel experiment on canopy structural parameters of isolated tree and wind velocity field characters nearby [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(2): 202-204. (in Chinese)
- [11] 徐志. 周边树木对低矮房屋挡风性能的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
XU Zhi. Study on the windbreak performance of trees on the low-rise buildings [D]. Beijing: Beijing Jiaotong

- University, 2013. (in Chinese)
- [12] 李正农, 蔡笑影. 基于格子 Boltzmann 法的树木流场数值模拟[J]. 广西大学学报自然科学版, 2019, 44(1): 269-278.
- LI Zhengnong, CAI Xiaoying. Numerical simulation of tree flow field based on lattice Boltzmann method [J]. Journal of Guangxi University Natural Science Edition, 2019, 44(1): 269-278. (in Chinese)
- [13] 李正农, 李枫, 陈斌, 等. 树木风荷载与流场特性的风洞试验[J]. 林业科学, 2020, 56(8): 173-180.
- LI Zhengnong, LI Feng, CHEN Bin, et al. Wind tunnel test on wind load and flow field characteristics of trees [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(8): 173-180. (in Chinese)
- [14] 崔云静. 新疆杨在风荷载作用下的应力应变分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- CUI Yunjing. The stress-strain analysis under wind load of populus bolleana [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)
- [15] 李正农, 周立凡. 基于图像处理技术的树木疏透度确定方法研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(5): 175-182.
- LI Zhengnong, ZHOU Lifan. Research on the method of determining tree porosity based on image recognition technology [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(5): 175-182. (in Chinese)
- [16] 彭勇波, 艾晓秋, 承颖瑶. 风致树木倒伏研究进展[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(5): 167-175.
- PENG Yongbo, AI Xiaoqiu, CHENG Yingyao. Advances in research on wind-induced trees lodging [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(5): 167-175. (in Chinese)
- [17] 李利孝, 蔡鸣, 宋健, 等. 深圳市阴香类行道树风致失效模式及失效风速预测研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(2): 148-155.
- LI Lixiao, CAI Ming, SONG Jian, et al. Study on the wind-induced failure mode and failure wind speeds of *Cinnamomum burmannii* street trees in Shenzhen [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(2): 148-155. (in Chinese)
- [18] 方立伟. 三维激光扫描技术在隧道工程中的应用分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(2): 163-165.
- FANG Liwei. Application analysis of 3D laser scanning technology in tunnel engineering [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2023, 46(2): 163-165. (in Chinese)
- [19] 吴建. 一种基于车载三维激光扫描的行道树数据采集处理方法研究[J]. 城市勘测, 2018(6): 70-75.
- WU Jian. Study on a road tree acquisition and processing method based on vehicle 3D laser scanning [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2018 (6): 70-75. (in Chinese)
- [20] 周烨, 刘云波, 郑丽波, 等. 多平台点云数据的单木参数提取精度分析[J]. 测绘通报, 2022(7): 168-172.
- ZHOU Ye, LIU Yunbo, ZHENG Libo, et al. Precision analysis of single tree parameter extraction for multi-platform point cloud data [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(7): 168-172. (in Chinese)
- [21] 何定颖. 树木风致响应及对低矮房屋风压分布的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- HE Dingying. Wind-induced response of trees and its effect on wind pressure distribution in low-rise buildings [D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)
- [22] 洪成器, 江浦琼, 杨学亮, 等. 南洋楹木材物理力学性质试验报告[J]. 福建林业科技, 1982(1): 16-23.
- HONG Chengqi, JIANG Puqiong, YANG Xueliang, et al. Test report on physical and mechanical properties of *Jacaranda* wood [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 1982 (1): 16-23. (in Chinese)
- [23] 李枫. 树木风致受力与对树后流场影响的风洞试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- LI Feng. Wind tunnel test study on wind force of trees and its influence on flow field behind trees [D]. Changsha: Hunan University, 2020. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之聿】



补充材料