

# 风载荷作用下树木干折规律研究

徐华东\* 凌 昊 于宽杰

(东北林业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘 要:** 为更好地保护树木树干健康, 降低其干折风险, 该文探究树木在不同风载荷作用下的干折规律。利用树木自相似和自仿射的特点, 基于参数化建模思路, 构建多样化结构形态的树木地上部分几何模型。在风载荷作用下, 运用流固耦合原理和有限元理论对3种东北典型树种(白杨 *Populus tomentosa* Carrière、榆树 *Ulmus pumila* L.和云杉 *Picea koraiensis* Nakai)进行干折模拟。结果表明: 树木的抗干折能力受结构形态、胸径和树种的影响; 对于同一树种, 与树木结构形态相比胸径对树木抗干折能力的影响较显著, 树木胸径越大, 抗干折能力越强; 不同树种的抗干折能力具有显著差异; 当风速达到 15 m/s 时, 胸径小于 18 cm 的白杨易发生干折倒伏; 风速增至 20 m/s 时, 胸径小于 15 cm 的榆树具有一定的干折风险。通过拉伸试验获得的形变及倾斜度数据表明, 当施加压力在 0~0.6 kN 范围内, 白杨形变值为 17.65~32.47  $\mu\text{m}$ , 倾斜度为 0.046°~0.101°; 榆树形变值为 8.67~22.34  $\mu\text{m}$ , 倾斜度为 0.008°~0.04°; 云杉形变值为 0.93~2.46  $\mu\text{m}$ , 倾斜度为 0.031°~0.061°, 拉伸试验数据验证了数值模拟结果。

**关键词:** 树木健康; 树木模型; 干折; 风载荷; 数值模拟

中图分类号: S761.2 文献标识码: A 文章编号: 2097-5279(2025)01-0038-10

## Trunk break rule of tree under wind loads

XU Huadong\* LING Hao YU Kuanjie

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** To better protect the health of tree trunks and reduce their risk of wind breakage, this paper explores the break rule of tree trunk under different wind loads. Using the characteristics of tree self-similarity and self-affinity, a geometric model of the above ground part of trees with diversified structural morphology is constructed based on the idea of parametric modeling. Under the action of wind load, three common trees (*Populus tomentosa* Carrière, *Ulmus pumila* L. and *Picea koraiensis* Nakai) in Northeast China were simulated by using the principle of fluid-structure coupling and finite element theory. The simulation results show that the resistance of trees to trunk break is affected by structural form, diameter at breast height (DBH) and tree species. For the same species, DBH is the most significant factor. The larger the DBH, the stronger its resistance to trunk break. And the resistance to trunk break of the different tree species is different. When the wind speed reaches 15 m/s, *Populus alba* with a diameter at breast height of less than 18 cm is prone to trunk break and collapse; *U. pumila* with a diameter at breast height of less than 15 cm is at risk of trunk break when wind speed increases to 20 m/s. Deformation and tilt data are obtained by tensile testing in field. When the applied tension force is in the range of 0-0.6 kN, the deformation value of *P. tomentosa* is 17.65-32.47  $\mu\text{m}$ , and the tilt is 0.046°-0.101°; the deformation value of *U. pumila* is 8.67-22.34  $\mu\text{m}$ , and the tilt is 0.008°-0.04°; and the deformation value of *Picea asperata* is 0.93-2.46  $\mu\text{m}$ , and the tilt is 0.031°-0.061°. The accuracy of the simulation results was verified.

**Key words:** tree health; tree modelling; trunk break; wind load; numerical simulation

健康的树木不仅能够提供清新的空气和美丽的景观, 还承担着调节气候、涵养水源、调控物种多样性等多种功能。保护树木健康, 不仅需要定期对树木进行科学养护和修剪, 还需要关注周围环境因素的变化, 避免病虫害的侵袭以及极端气候引发的树

木干折问题。我国东北地区具有多风、低温等特殊气候条件, 树木产生干折的风险高。

通常, 施加到树木上的风载是一种动态载荷, 其频率、强度不会固定在某个数值不变, 因此树木对风载荷的响应是一种动态行为。除此之外, 树木的结

收稿日期: 2024-11-08; 修回日期: 2024-11-27。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31870537); 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2024C054); 中央高校基本科研项目(2572022BL03)。

\* 通信作者: 徐华东 (E-mail: huadongxu@nefu.edu.cn), 教授。

构和材性在风载荷作用时也会起到阻尼作用。学者们已采用不同的方法对树木抗干折能力问题展开研究。早在1974年, Papesch(1974)根据树木的生理特性及形态结构, 将树木假定为一端固定的悬臂梁模型, 以随着时间变化的正弦波曲线形式的风速将风载荷施加到该模型上。Jackson等(2019)将地面激光扫描技术与有限元分析相结合, 在数值模型上对树干进行应力应变分析。除了数值仿真研究, Mattheck(1993)、Brudi(2002)、Kane(2008)等通过树木拉伸试验, 研究了树木的断裂和倒伏行为。经过研究人员的不断探索, 目前应用广泛的树木力学模型有3种: HWIND模型、GALES模型和FOREOLE模型(Peltola et al., 1999; Gardiner et al., 2000; Ancelin et al., 2004), 这些模型存在的主要问题是树干模型多以正交各向同性材料为理论依据, 而实际上树干内部结构复杂, 以各向异性材料分析更为切合实际。此外, 目前的模型泛化能力较差, 针对不同的树种或者树木通常需要构建不同的模型。

树木干折受到多种因素影响, 如胸径、树高、风速、瞬时风压以及树木材性等。国内学者针对树木与风的关系已开展了一些研究。徐风等(2019)分析了不同树冠孔隙度对风速、湍流强度以及风压的影响; 黎良辉(2018)通过有限元法研究了树干风振效应; 张鳌(2016)采用线性滤波法模拟脉动风结合树木有限元模型, 研究了我国沿海防护林树种黑松的风致力学响应; 黄笑等(2019)模拟了树冠类型与风速、风压的关系; 杨会等(2016)模拟分析了叶面积指数等指标对风速变化的影响; 谭旭等(2024)利用无损重构技术和有限元技术, 研究一种风载荷下树木稳定性的评估方法, 通过探地雷达(ground penetrating radar, GPR)无损获取根系构型, 结合三维重构技术和阻力公式, 构建风载荷下的树木模型并评估树木稳定性状况。上述研究多针对森林中树木开展研究, 主要研究目标是树木的风振特性, 目前以分析树木安全性为目的联合开展树木风振特性数值模拟和拉伸试验测试的研究较少; 研究的树种也有一定局限性, 针对东北地区多因素影响下多树种的风响应问题鲜见报道。

为更好地保障树木健康, 服务东北地区乃至中国北方地区园林树种养护和人工林经营, 本文将针对东北地区3种典型树种树木, 采用参数化建模方法和流固耦合模拟技术, 在野外试验基础上, 利用数值模拟技术, 研究不同树种树木在风载荷作用下的抗干折能力, 以期提出一种泛化能力强的树木地上部

分参数化建模方法, 确定树木抗干折能力的敏感影响因素, 为树木健康研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

研究区位于黑龙江省哈尔滨市东北林业大学实验林场, 林场于20世纪50年代末期进行了人工造林, 场内分布着18个树种的人工林。选取白杨 *Populus tomentosa* Carrière、榆树 *Ulmus pumila* L.、云杉 *Picea koraiensis* Nakai 3个树种开展研究, 每个树种6株, 选取(15±1.5)cm和(18±1.5)cm 2个胸径范围内的树木各3株, 总计18株。

研究方法包括数值模拟比较和试验测试比较, 将样本树分为3个层次进行对比。同种同径(树种和胸径均相同)树木对比, 探究树木结构形态对抗干折能力的影响; 同种异径树木对比, 探究胸径对抗干折能力的影响; 同径异种树木对比, 探究树种对抗干折能力的影响。

### 1.2 树木基础数据测试和拉伸试验

确定研究对象后, 首先对样本树的树高、胸径、分形维数、枝条长度、枝条生长角度、枝干粗细比等基础数据进行测试, 为树木数值模型构建提供参数化数据。

另外, 对样本树逐株进行拉伸试验, 拉伸试验结果用于校正数值模拟结果。拉伸试验时, 在不破坏树木的前提下, 采用树木静力拉伸仪(德国Tree Qinetic)和手动绞盘对所选树木进行小幅度弯曲拉伸试验, 采集树干拉伸过程中的形变数据以及树木根基处的倾斜角度, 分析白杨、榆树和云杉的抗弯性。具体试验过程是: 利用绳索将所测树木、拉力计、手动绞盘和锚固树依次连接到锚固点(图1); 为使施加的力更好地作用到树木整体, 模拟风力, 将锚固点设为树木主干的中间位置, 距地面3m处; 在树干受力一侧安装弹性仪, 并固定到距地面1.5m处, 在弹性仪正下方的树木基部放置倾斜仪, 监测树木倾斜情况。在配套软件上配置传感器的警报限值和其他相关设置。开始测试时, 所有传感器都设置为零点, 逐渐施加拉力(模拟不同强度风载荷), 直到任一传感器的读数超过预设的警报值为止, 停止拉伸, 收集数据。

### 1.3 风载荷作用下树木干折数值模拟

#### 1.3.1 树木几何模型构建

树木是自然界中复杂的生物实体, 拥有独特的自相似和自仿射分型特征。以东北典型树种白杨、榆树和云杉为研究对象, 通过三维建模软件Pro/Engineer



图1 树木拉伸试验现场图  
Fig. 1 Field test of tree tensile

注: A. 拉力计; B. 弹性仪; C. 倾斜仪; D. 距地面 3 m 处。

Notes: A. Tensile force gauge; B. Elastometer; C. Inclinometer; D. 3 m above the ground.

的 UDF 功能对树木地上部分进行参数化建模, 能够快速、精确地构建几何模型。模型构建过程中, 首先基于树干、主枝、次枝的相互连接方式和生长逻辑, 确定参数化模型组成; 然后采集树木生长数据, 综合考虑树种、生长周期、生态环境等因素, 提取对应的分形维数、枝条生长角度、枝干粗细比等关键参数, 以实现分型特征参数的精确控制; 最后通过对基本模型进行参数化调整和拼装, 形成复杂、精准、树木结构形态多样的树木整体几何模型(图 2)。

与试验树木相对应, 构建胸径为(15±1.5)cm 与(18±1.5)cm 2 组树木的有限元模型, 每个胸径范围内各构建 3 个结构形态不同的模型。将同种同径级不同形态的 3 株树列为一组, 即胸径(15±1.5)cm 范围

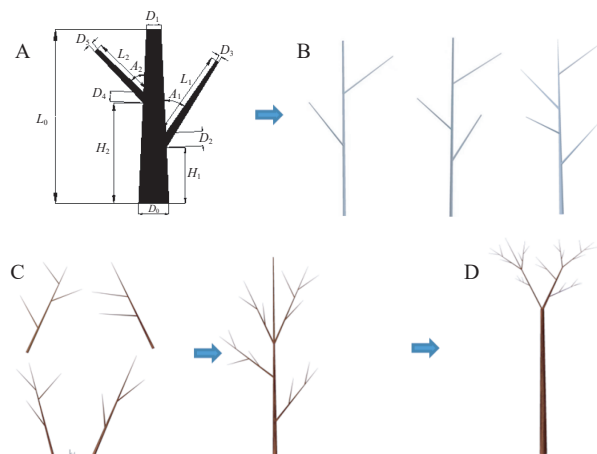


图2 1号白杨树木数值模型构建过程

Fig. 2 Construction process of No. 1 Poplar tree model

注: A. 双枝基础单元二维模型; B. 基础单元(双枝、三枝、四枝); C. 模型参数调整及拼装; D. 树木整体模型。

Notes: A. Two-dimensional model of a double-branch base unit; B. Base unit (double, triple, quadruple-branch); C. Model parameterization and assembly; D. Overall model of tree.

为 1 组, 胸径(18±1.5)cm 范围为 2 组, 共计 6 组、18 个树木模型。对模型进行单向流固耦合分析, 计算其在 10, 15, 20 m/s 风速作用下的位移与应变。

以其中 1 株白杨为例(标记为 1 号, 树高 9.69 m, 胸径 15.18 cm, 2 个一级分支, 7 个二级分支, 16 个三级分支), 介绍参数化建模过程。白杨 1 号树木地上部分模型几何参数见表 1、表 2 和表 3, 利用参数化建模方法即可构建白杨地上部分模型。在构建榆树、云杉等树种树木模型时, 只需改变上述建模过程中涉及到的形状参数, 即可快速完成不同结构形态树

表 1 1号白杨一级分枝几何参数

Tab. 1 Geometrical parameters of primary branch

一级枝序号 Primary branch number	一级枝长度 L/mm Length of primary branches	一级枝与主干夹角 A/° Angle between primary branch and trunk	一级枝基径 D/mm Primary branch basal diameter	一级枝同主干正视图夹角 B/° Angle of a primary branch in front view of the trunk	一级枝距主干底端高度 H/mm Height of primary branch from the base of the trunk
1	1 855	20	30.4	15	6 930
2	1 045	20	60.7	15	6 930

表 2 1号白杨二级分枝几何参数

Tab. 2 Geometrical parameters of secondary branch

二级枝序号 Secondary branch number	所在一级枝序号 Number at the first level	二级枝长度 L/mm Length of secondary branches	二级枝与一级枝夹角 A/° Angle between secondary and primary branch	二级枝基径 D/mm Secondary branch basal diameter	二级枝同一级枝正视图夹角 B/° Angle of a secondary branch in front view of a primary branch	二级枝距一级枝高度 H/mm Height of secondary branch from primary branch
01	1	1 017	35	22.8	30	557
02	1	1 065	35	23.2	20	742
03	1	1 023	45	22.6	40	742
04	2	1 041	40	23.4	45	314
05	2	920	55	21.3	30	418
06	2	1 134	25	23.7	35	627
07	2	976	25	22.1	25	627

表 3 1 号白杨三级分支几何参数  
Tab. 3 Geometrical parameters of tertiary branch

三级枝序号 Tertiary branch number	所在二级枝序号 Number at the second level	三级枝长度 $L/mm$ Length of tertiary branches	三级枝与二级枝夹角 $A/^\circ$ Angle between tertiary and secondary branch	三级枝基径 $D/mm$ Tertiary branch basal diameter	三级枝同二级枝正视图夹角 $B/^\circ$ Angle of a tertiary branch in front view of a secondary branch	三级枝距二级枝高度 $H/mm$ Height of tertiary branches from secondary branches
001	01	307	50	9.3	20	286
002	01	320	45	10.7	30	610
003	01	408	55	12.2	45	814
004	02	350	35	13.8	35	303
005	02	318	60	11.7	25	790
006	03	402	65	10.1	60	385
007	03	357	60	9.5	55	614
008	04	385	55	10.4	40	342
009	04	312	40	15.3	30	730
010	04	287	20	12.2	55	833
011	05	348	15	12.8	15	423
012	06	372	20	14.6	35	345
013	06	430	55	11.7	25	680
014	06	364	35	13.6	50	794
015	07	303	30	12.4	20	537
016	07	312	25	14.5	30	280

木模型的构建。这种建模方法即节省建模时间,又可保证所构建树木模型的准确性。

1.3.2 风载荷作用下树干弯曲变形模拟计算

为了能够精确模拟树木在风载荷作用下的弯曲以及干折现象,不仅要构建树木几何模型,还需要构建一个既能精确反映树木结构几何属性,又能准确表征其力学行为的有限元模型。构建有限元模型的前提是,已知树干和各级分枝材料的物理力学特性,包括其密度、径向与轴向的弹性模量、泊松比和剪切模量。因此,本文将树干视为正交各向异性材料,分析树干力学性能。

依据前文树木弯曲拉伸试验,利用树木拉伸过程中产生的弹性形变、拉力大小以及绳角等数据计算树木的静态弹性模量(图 3)。将树木在横截面上受到的斜向拉力  $F$  分解为轴向力  $F_N$  和横向拉力  $F_M$  (图 3A)。 $\sigma_N$  为轴向压力  $F_N$  对横截面产生的压缩正应力(图 3B),压缩正应力计算公式为:

$$\sigma_N = \frac{F_N}{A} = \frac{F \cdot \sin\theta}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4F \cdot \sin\theta}{\pi D^2} \quad (1)$$

横向拉力  $F_M$  作用于树木时,树体发生平面弯曲,产生的最大弯矩为  $M_{max}$ ,弯曲应力为  $\sigma_M$ ,横截面上的弯曲应力呈线性分布(图 3C)。最大弯曲正应力计算公式为:

$$\sigma_M = \frac{M_{max}}{W} = \frac{M \cdot \frac{D}{2}}{I_Z} = \frac{F_M \cdot H \cdot \frac{D}{2}}{\frac{\pi D^4}{64}} = \frac{32F \cdot H \cdot \cos\theta}{\pi D^4} \quad (2)$$

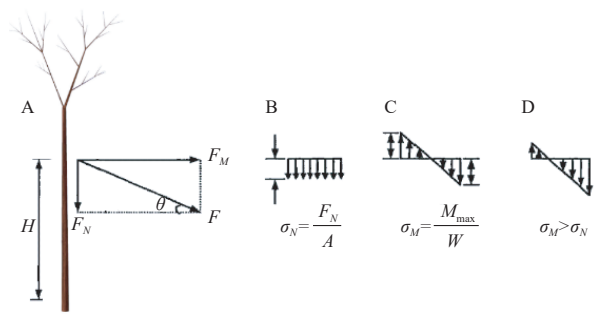


图 3 树木拉伸受力分析及截面应力计算简图  
Fig. 3 Sketch of tree tensile force analysis and cross-section stress calculation

注: A. 树干受力示意图; B. 压缩正应力; C. 弯曲正应力; D. 力的合成图;  $H$  为拉力作用点与测试截面之间的距离,为 1.5 m。  $F$  为绳索给树施加的拉力,并分解为轴向力  $F_N$  和横向拉力  $F_M$ ;  $\sigma_M$  和  $\sigma_N$  分别为最大弯曲正应力和轴向压缩正应力;  $M_{max}$  为最大弯矩;  $A$  和  $W$  分别为受力面积和截面模数。

Notes: A. Schematic diagram of the force on the trunk; B. Compression positive stress; C. Bending positive stress; D. Composite diagram of the force;  $H$  is the distance between the point of tension and the test section, which is 1.5 m.  $F$  is the tension force exerted by the rope to the tree and decomposed into axial force  $F_N$  and transverse tension  $F_M$ ;  $\sigma_M$  and  $\sigma_N$  are the maximum bending positive stress and axial compression positive stress, respectively;  $M_{max}$  is the maximum bending moment;  $A$  and  $W$  are the area of the force and the section modulus, respectively.

最大弯曲正应力  $\sigma_M$  大于轴向压缩正应力  $\sigma_N$ , 所以将这两种应力叠加后,正应力沿截面横向的变化情况如图 3D 所示,总应力计算公式为:

$$\sigma = \sigma_M + \sigma_N \quad (3)$$

被测截面的应变可通过该处的形变求出,计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4)$$

测试树木树干的静态弹性模量可通过式(5)计算:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{(\sigma_M + \sigma_N)L}{\Delta L} \quad (5)$$

式中,  $F$  为拉伸试验中绳索给树施加的拉力;  $\theta$  为绳索与树干之间的夹角;  $D$  为被测截面的直径;  $M$  为弯矩;  $I_z$  为测试截面对中性轴  $Z$  的惯性矩;  $H$  为拉力作用点与测试截面之间的距离, 为 1.5 m;  $L$  为拉伸试验中弹力计的 2 个悬挂钉之间的距离, 为 20 cm;

$\Delta L$  为树木在拉力作用下的变形量, 由弹力计测得;  $E$  为树木的静态弹性模量。根据 Gardiner (1989) 的研究, 可知树干的弹性模量、抗弯强度和抗压强度一般为木材的 85%, 一级枝条一般为树干的 80%, 二级枝条一般为一级枝条的 70% 左右。以树木拉伸试验测得的树干弹性模量及林业行业权威参考书籍为依据 (李坚等, 2009), 分别设置 3 种树木树干、一级分支、二级分支的径向、轴向弹性模量及密度、泊松比和剪切模量等基本参数 (表 4)。

表 4 三种树木的各向异性力学参数

Tab. 4 Anisotropic mechanical parameters of three types of trees

树种 Species	位置 Location	密度 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) Density	弹性模量 / MPa Elastic modulus			泊松比 Poisson's ratio			剪切模量 / MPa Shear modulus					
			$E_L$	$E_R$	$E_T$	$\mu_{RT}$	$\mu_{LR}$	$\mu_{LT}$	$G_{LT}$	$G_{LR}$	$G_{TR}$			
白杨 Poplar	树干 Trunk	300	8 400	805	452	0.70	0.37	0.49	540	350	33			
	一级枝 Primary branch		6 720	644	362							432	280	26
	二级枝 Secondary branch		5 040	483	271							324	210	20
榆树 Elm	树干 Trunk	460	11 239	1 172	621	0.72	0.49	0.63	690	896	228			
	一级枝 Primary branch		8 991	938	497							552	717	182
	二级枝 Secondary branch		6 743	703	373							414	538	137
云杉 Spruce	树干 Trunk	380	9 500	896	496	0.43	0.37	0.47	690	758	39			
	一级枝 Primary branch		7 600	717	397							552	606	31
	二级枝 Secondary branch		5 700	538	298							414	455	23

注:  $E_L$ 、 $E_R$  和  $E_T$  分别为顺纹、水平径向和水平弦向弹性模量;  $\mu_{RT}$  为径向延展应力的泊松比,  $\mu_{LR}$  和  $\mu_{LT}$  分别为 2 个方向顺纹延展应力的泊松比;  $G_{LT}$ 、 $G_{LR}$  和  $G_{TR}$  分别为顺纹-弦面、顺纹-径向和水平面剪切模量。

Notes:  $E_L$ ,  $E_R$  and  $E_T$  are elastic modulus along grain, horizontal radial and horizontal chord elastic modulus, respectively;  $\mu_{RT}$  is Poisson's ratio of radial extension stress,  $\mu_{LR}$  and  $\mu_{LT}$  are Poisson's ratios of parallel extension stress in two directions respectively;  $G_{LT}$ ,  $G_{LR}$  and  $G_{TR}$  are the shear moduli along grain-chord plane, along grain-radial direction and horizontal plane, respectively.

强风作用下的树木运动可看作由树冠和树干组成的固体域同流体域的空气相互作用的过程。由于树木与空气之间存在反复交互作用, 即空气流动造成树木形变, 而树木形变又反过来影响空气流动, 因此树木在风载荷作用下的弯曲过程属于强流固耦合现象。陶嗣巍 (2013) 通过对白杨进行风振分析发现, 单向流固耦合法计算得到的位移峰值同试验值非常接近, 故本文采用单向流固耦合法对风载荷作用下树干弯曲形变进行有限元模拟研究。

在单向流固耦合模拟时, 以树干底端为中心, 建立流场区域, 对模型进行精细化网格划分。网格划分方法为四面体网格划分 (tetrahedrons)。为了实现从过渡风场区域到流固耦合面的平滑过渡, 避免网

格突变, 网格划分时在过渡风场区域与流固耦合面之间添加膨胀层 (inflation), 膨胀层也可以使边界层处的网格变密, 便于描述风场在流固耦合面 (边界层) 处的梯度变化。网格划分精度为 1 cm (不同树由于树高、形态不同, 划分网格数量不同), 由于树与树枝连接处几何形状突变严重, 因此平均网格质量要求不低于 0.8 才能在流固耦合计算中收敛。使用 Fluent 进行风场计算, 选用速度入口边界条件和质量出口边界条件对风场模型进行定义。由于哈尔滨近 10 年常出现的强风等级在 6~8 级, 故选择对应的风速 10, 15, 20 m/s 进行单向流固耦合计算。风场计算时, 采用 SIMPLE 算法, 在风场入口处施加风载荷, 由于不同高度风速不同, 需利用 Fluent 的 UDF 功能按式 (6)

对不同高度的风速进行定义, 即:

$$v_2 = v_1 \left( \frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (6)$$

式中,  $\alpha$  为风切变指数;  $z_1$  为已知高度, 此处取 11 m;  $z_2$  为变化后风速所在高度;  $v_1$  为高度  $z_1$  处的风速;  $v_2$  为高度  $z_2$  处的风速。

设定计算时间为 350 s, 时间步长为 0.01 s。将每一步长的迭代次数设为 20 次, 收敛精度为 0.01。计算风场中空气的流动速度与压强, 导出数值模拟的计算结果。在 Transient Structural 模块中将风场内通过模拟得到的风载荷加载到树木模型上, 得到树木模型的形变情况。

## 2 结果与分析

### 2.1 结构形态对树木干折的影响

图 4 展示了胸径 18.30 cm 的榆树模型在 15 m/s 风速作用下分枝与树干的应力云图。通过有限元分析, 得到 3 个树种树干模型的最大应力均值(表 5)。观察发现同组内应力的标准差均在 2 MPa 以内, 这说明树种相同胸径相近前提下, 结构形态不同的树木最大应力差值较小, 进一步分析表明树木结构形态对其抗干折能力影响较弱。例如, 当风速达到 10 m/s

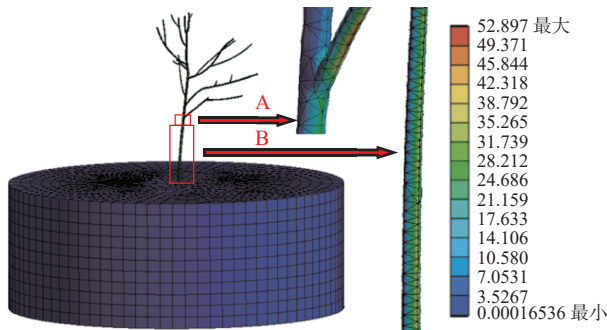


图 4 榆树分枝处与树干底端处的应力云图

Fig. 4 Stress cloud at branch and at trunk bottom of elm

注: A. 分枝处应力云细节图; B. 树干部分应力云细节图。

Notes: A. Detailed view of the stress cloud at the branches; B. Detailed view of the stress cloud in the trunk section.

表 5 风载荷作用下每组树干模型的最大应力均值

Tab. 5 Mean values of maximum stresses in each group of trunk model under wind load

风速/(m·s <sup>-1</sup> ) Wind speed	应力 Stresses / MPa											
	白杨 1 组 Poplar group 1		白杨 2 组 Poplar group 2		榆树 1 组 Elm group 1		榆树 2 组 Elm group 2		云杉 1 组 Spruce group 1		云杉 2 组 Spruce group 2	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
10	36.35	0.39	30.85	0.56	33.17	0.89	27.76	0.49	25.62	0.43	21.52	0.38
15	48.56	0.56	40.89	1.50	43.54	0.72	36.30	0.39	34.15	0.31	28.19	0.35
20	55.13	1.24	48.03	0.61	49.56	1.15	40.82	0.63	38.27	1.19	31.97	0.33

注: Mean 表示平均值; Standard Deviation(SD) 表示标准差。

Notes: Mean indicates average, SD indicates Standard Deviation.

时, 胸径相近但结构形态不同的 3 株白杨, 胸径分别为 15.18, 15.37, 15.21 cm 的树干最大应力分别为 36.71, 35.94, 36.41 MPa, 变化范围在 0.77 MPa 内。其余 5 组数据存在类似规律。

### 2.2 胸径对树木干折的影响

对于同一树种, 不同胸径树木的最大应力均值拟合曲线差异极显著 ( $P < 0.001$ )。随着胸径的增大, 树干最大应力出现了明显下降(图 5)。当风速为 10 m/s 时, 白杨、榆树和云杉 2 组树干的应力均值较 1 组均降低约 5 MPa。随风速增大, 每组树木树干的应力随之增大, 两组变化趋势基本一致。当风速由 10 m/s 增至 20 m/s 时, 胸径约 15 cm(1 组) 的白杨、榆树和云杉树干最大应力均值增幅分别为 18.78, 16.39, 12.65 MPa; 胸径约 18 cm(2 组) 的 3 种树木对应数据增幅分别为 17.18, 13.06, 10.45 MPa。上述分析表明, 胸径对树木干折有显著影响, 胸径增大会降低白杨、榆树和云杉树木产生干折的机率。同时, 对于同一树种, 在相同风速作用下, 胸径对树木干折的影响较树木结构形态大, 结构形态对树木干折的影响较小(表 5)。

### 2.3 树种对树木干折的影响

树种是影响树木干折的关键因素之一, 不同树

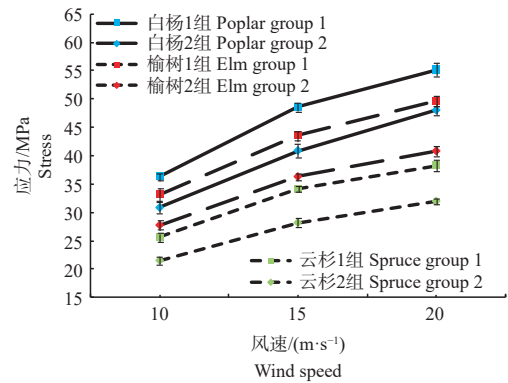


图 5 不同胸径树木树干处的最大应力均值拟合曲线

Fig. 5 Fitted curves of the mean values of maximum stress values at the trunks for different DBH (Diameter at Breast Height)

种具有不同的材料特性以及结构形态,使不同树种间的抗干折能力产生了较大差异。图 6A 展示了 (15±1.5) cm 胸径范围内 3 个树种在不同风速下树干处应力最大值。图 6A 显示,随风速增大,3 种树木树干最大应力均值都增大,但三者之间的相对关系保持不变。当风速为 15 m/s 时,白杨 1 组树干的应力最大值为 48.56 MPa; 榆树 1 组树干最大应力均值为 43.54 MPa, 低于同胸径的白杨组; 云杉 1 组应力值最

低,为 34.15 MPa。上述数据表明,风速相同且胸径相近的情况下,云杉树干的应力最大值低于其他 2 个树种,白杨树干的应力最大值最高。换言之,在 (15±1.5) cm 胸径范围内,云杉抗干折能力最强,榆树次之,白杨最弱。进一步分析 (18±1.5) cm 胸径范围内数据发现,树干最大应力值排序依然是:白杨,榆树,云杉(图 6B), 3 个树种抗干折能力排序为:云杉,榆树,白杨。

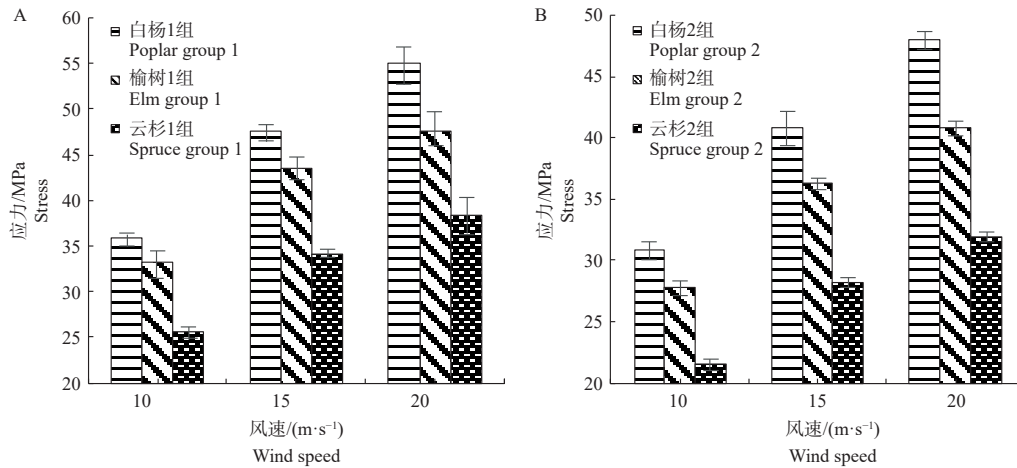


图 6 树种与树木树干最大应力均值的关系图

Fig. 6 Relationship between mean values of maximum stress of trunk and tree species

注: A. 胸径(15±1.5)cm 范围内 3 种树木; B. 胸径(18±1.5)cm 范围内 3 种树木。

Note: A. three groups of trees in the range of (15±1.5) cm diameter at breast height; B. three groups of trees in the range of (18±1.5) cm diameter at breast height.

不同树种木材的抗弯强度不同,查阅文献得到 3 种木材的抗弯强度:白杨 58 MPa,云杉 69.5 MPa,榆树 78 MPa(鹿振友等, 1995; Yoshihara et al, 2007; Rede et al, 2017)。受含水率等因素影响,树干的弹性模量等力学参数低于木材,设定 3 种树木的抗弯强度为白杨 50 MPa、云杉 60 MPa、榆树 70 MPa。在风速达到 20 m/s 时,白杨 1 组的树干处的最大应力均值达到了 55.13 MPa,超过了其抗弯强度 50 MPa,说明极易发生

干折;在风速 10 m/s 条件下,白杨 1 组与 2 组的树干处最大应力均值 30.85~36.35 MPa,与其抗弯强度相差不到 20 MPa,这说明只要风速达到 10 m/s 以上,胸径 18 cm 以下的白杨都有干折风险(图 7)。同时,分析榆树数据发现,在风速达到 20 m/s 时,榆树 1 组的树干处最大应力均值分别为 49.56 MPa,与其抗弯强度相差接近 20 MPa,表明存在一定的干折风险。但对于云杉,风速 20 m/s 时树干处最大应力均值 31.97~38.27 MPa,与其抗弯强度相差超过 20 MPa,说明干折风险较小。

### 3 讨论

树木抗干折能力影响因素较多,除了本文讨论的树种、胸径和树木结构形态外,还应包括树木材性、立地气象条件、树高等。通常认为,树枝折断多为枝干生长速度快、木质脆弱的树种(例如杨树),而木材纤维长、抗弯能力高(云杉),木质硬、密度高、抗拉强度高(榆树)的树种抗干折能力较强。尤其是榆树,木材柔韧性较好,通常不易折断。本文研究结果表明,云杉抗干折能力更好,这可能与针叶树和阔叶

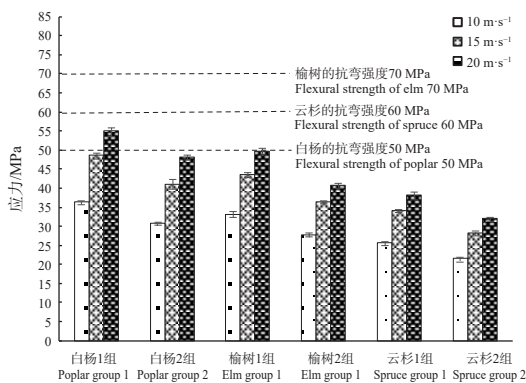


图 7 六组树木树干处最大应力均值

Fig. 7 Mean values of maximum stress at the trunks of six groups of trees

树具有不同的结构形态有关。针叶树树形为塔型，迎风面积较小，相对更易于过滤风阻。此外，树木在长周期风(不叠加高频阵风)作用下，出现树木干折的概率，明显低于平均风速相同而叠加了高频阵风的情况。这是由于树木出现干折和干弯现象，往往是由瞬间的强风造成的。当树干运动出现顺风向位移的最大值时，树干的应力也达到最大值，也是树干最容易弯曲和断裂的时刻。因此，风载荷的加载方式也是未来需要探讨的因素。本文仅为探索性研究，针对不同树种树木的抗干折能力，仍有必要开展更为系统的试验和仿真研究，并进行多因素分析才能得到科学、切合实际的结论。张德顺等(2023)对国内城市树木抗风研究中存在的问题进行了系统阐述，结合城市绿化强风响应的现状，并根据生态可持续原则，建议构建理想的抗风模型，对园林树木抗风过程进行探究。

树木拉伸试验是树木抗风性或者抗干折能力研究有效的验证方式。本文通过树木拉伸试验发现，所测树木拉力-形变拟合曲线的回归方程均为正比例函数， $R^2$  均在 0.96 以上，说明样本树在距地面 1.5 m 处的形变值随拉力增加呈线性增大趋势，树干一直处于线弹性状态，未对其造成破坏。图 8 展示了同一树种结构形态和胸径对树木抗干折能力的影响。对比同种树木的拉力-形变关系发现，白杨形变与拉力曲线的斜率范围为-46.03~-54.51，榆树和云杉对应数据分别为-34.12~-38.86和-2.58~-3.03。通常认为，曲线斜率值越小，表明树木抗干折能力越强。依据这一理念，3 种树木中云杉的抗干折能力最强，榆树次之，白杨最弱，分析结果与数值模拟结果一致。对相同树种来说，胸径相近但结构形态不同的拟合曲线斜率的绝对值相差仅为 0.03~2.92，而胸径相差 3 cm 时拟合曲线斜率的绝对值相差达到 0.50~6.0。试验

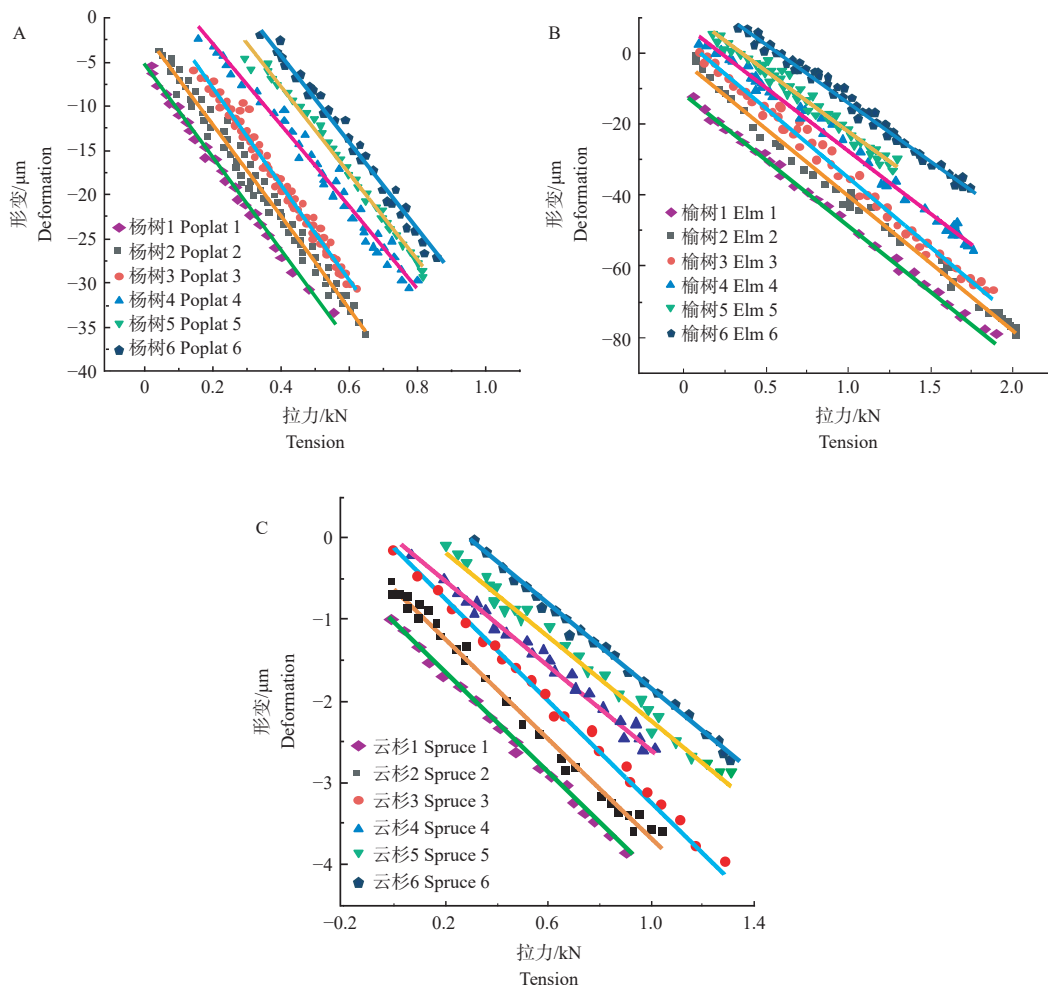


图 8 3 种树木在距地高度 1.5 m 处形变与拉力关系

Fig. 8 Deformation versus tensile force at a height of 1.5 m above the ground for three species

注: A. 白杨; B. 榆树; C. 云杉。

Notes: A. Poplar; B. Elm; C. Spruce.

数据同样较好地验证了数值模拟结果,表明结构形态对树木抗干折能力影响较小,而胸径影响较大。另外,当拉力相同时,胸径18 cm的树木形变值比胸径15 cm低1~12  $\mu\text{m}$ ,说明随胸径增大树木的抗干折能力在增强。试验还表明,0~0.6 kN范围内,白杨形变值为17.65~32.47  $\mu\text{m}$ ,倾斜度为0.046°~0.101°,形变值较大;榆树的形变值为8.67~22.34  $\mu\text{m}$ ,倾斜度为0.008°~0.040°,形变值较小;云杉的形变值为0.93~2.46  $\mu\text{m}$ ,倾斜度为0.031°~0.061°,形变值最小。

综上所述,对于同一树种,结构形态和胸径都会对树木抗干折能力产生影响,结构形态的影响较弱;胸径越大,树木抗干折能力越强。对于不同树种,抗干折能力由强到弱分别为:云杉,榆树,白杨。实验结果验证了模拟分析结果的准确性。

## 4 结论

树木抗干折能力会受其结构形态(张德顺等,2023)、胸径和树种的影响。对于同一树种,结构形态的影响较胸径弱,随着胸径的增大,树木抗干折能力在增强。在本研究的3个树种中,抗干折能力由强到弱依次为:云杉,榆树,白杨。模拟显示,当风速达到20 m/s时,胸径15 cm左右的白杨极易发生干折;当风速达到10 m/s以上,则胸径为18 cm左右的白杨也有干折风险。当风速达到20 m/s时,胸径小于15 cm的榆树存在干折风险;但胸径大于15 cm的云杉干折风险较小。受到0~2.0 kN拉力影响,树木倾斜度随拉力呈线性变化趋势,白杨、榆树和云杉在拉力0~0.6 kN范围内的倾斜度分别在0.046°~0.101°、0.008°~0.04°和0.031°~0.061°,倾斜度的波动范围也证明抗干折能力是云杉,榆树,白杨。

## 5 建议

### 5.1 多学科联合研究

树木干折研究涉及树木学、力学、土壤学、气象学等多个学科,未来可以联合多学科开展研究,研发更精确的模型。

### 5.2 加强原位数据采集

大规模长期数据采集和分析是精准建立树木干折模型的前提。通过传感器和监测设备采集树木生长、材性变化、根系发展、风力数据等信息。

### 5.3 引入人工智能算法

利用机器学习模型处理不同种类、形态、环境的树木数据,自动识别出不同树种、不同生长条件下干折的主要影响因素,优化树木管理和风险评估方法。

## 5.4 开发智能监测与预警系统

结合物联网技术,开发树木健康状况和环境条件的智能监测系统,实时分析树木的干折风险。结合地理信息系统(GIS)和气象数据,提供有针对性的预警和管理方案。

## 参 考 文 献

- 黄笑,云挺,薛联凤,等. 2019. 基于流体运动仿真的不同林冠形状抗风强度分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 43(2): 107-113.
- (Huang X, Yun T, Xue L F, et al. 2019. Influence of forest canopy shape on windbreak variables using a fluid simulation technique[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 43(2): 107-113.)
- 李坚等. 2009. 木材科学研究[M]. 北京: 科学出版社.
- (Li J, et al. 2009. Wood Science Research[M]. Beijing: Science Press.)
- 黎良辉. 2018. 白云机场扩建交通中心大型乔木-树池节点风振动力响应分析[D]. 广州: 广州大学.
- (Li L H. 2018. Wind-induced dynamic response analysis of large tree-tree pool joints in Baiyun Airport extension transportation center[D]. Guangzhou: Guangzhou University.)
- 鹿振友,孙立谭. 1995. 速生毛白杨杂交新品种力学性质研究[J]. 北京林业大学学报, 17(1): 68-71.
- (Lu Z Y, Sun L E. 1995. Studies on the mechanical properties of poplar hybrid new breeds[J]. Journal of Beijing Forestry University, 17(1): 68-71.)
- 谭旭,张潇巍,李爽,等. 2024. 风载荷下树木稳定性的无损评估方法[J]. 森林工程, 40(2): 127-141.
- (Tan X, Zhang X W, Li S, et al. 2024. A non-destructive method for assessing tree stability under wind loading[J]. Forest Engineering, 40(2): 127-141.)
- 陶嗣巍. 2013. 树木风振特性试验研究与有限元分析[D]. 北京: 北京林业大学.
- (Tao S W. 2013. Experimental study and finite element analysis of wind-induced vibration characteristics of trees[D]. Beijing: Beijing Forestry University.)
- 徐风,黄笑,顾一凡,等. 2019. 基于流体仿真的椭球型树冠抗风性能研究[J]. 林业工程学报, 4(3): 125-131.
- (Xu F, Huang X, Gu Y F, et al. 2019. Research on wind resistance of tree with ellipsoid shape crown based on fluid simulation[J]. Journal of Forestry Engineering, 4(3): 125-131.)
- 杨会,付海明. 2016. 树冠流动阻力特性数值模拟与实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 47(12): 4292-4300.
- (Yang H, Fu H M. 2016. Numerical simulation and experimental study of canopy flow resistance characteristics[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 47(12): 4292-4300.)
- 张鳌. 2016. 林场风荷载模拟及林木抗风有限元模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学.
- (Zhang A. 2016. Study on wind load simulation of forest farm and finite element simulation of forest wind resistance[D]. Beijing: Beijing Forestry University.)
- 张德顺,陈陆琪瑶,陈莹莹,等. 2023. 园林树木风振及其抗风性研究进展[J]. 世界林业研究, 36(4): 35-41.

- (Zhang D S, Chen L Q Y, Chen Y Y, *et al.* 2023. Research progress in wind vibration and wind resistance of landscape trees[J]. *World Forestry Research*, 36(4): 35–41.)
- Ancelin P, Courbaud B, Fourcaud T. 2004. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands[J]. *Forest Ecology and Management*, 203(1/3): 101–121.
- Brudi E. 2002. Trees and statics: an introduction[J]. *Arborist News*, 11(2): 28–33.
- Gardiner B A. 1989. Mechanical characteristics of Sitka spruce[J]. *Forestry Commission Occasional Paper*, 24(1): 1–11.
- Gardiner B, Peltola H, Kellomäki S. 2000. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees[J]. *Ecological Modelling*, 129(1): 1–23.
- Jackson T, Shenkin A, Wellpott A, *et al.* 2019. Finite element analysis of trees in the wind based on terrestrial laser scanning data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265: 137–144.
- Kane B, Clouston P. 2008. Tree pulling tests of large shade trees in the genus *Acer*[J]. *Arboriculture & Urban Forestry*, 34(2): 101–109.
- Mattheck C, Bethge K, Erb D. 1993. Failure criteria for trees[J]. *Arboricultural Journal*, 17(2): 201–209.
- Papesch A. 1974. A simplified theoretical analysis of the factors that influence windthrow of trees [J]. In *Proceedings of the 5th Australasian Conference on Hydraulics and Fluid Dynamics*. University of Canterbury, Christchurch, New-Zealand. 5(1): 235–242.
- Peltola H, Kellomäki S, Väisänen H, *et al.* 1999. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(6): 647–661.
- Rede V, Essert S, Kodvanj J. 2017. Annual ring orientation effect on bending strength of subfossil elm wood[J]. *Journal of Wood Science*, 63(1): 31–36.
- Yoshihara H, Tsunematsu S. 2007. Bending and shear properties of compressed Sitka spruce[J]. *Wood Science and Technology*, 41(2): 117–131.