

树木抗风能力测试新方法*

A New Method for Testing the Wind Resistance of Trees

吴贻军 王福利 邵卓平*

WU Yi-jun, WANG Fu-li, SHAO Zhuo-ping*

摘要: 介绍一台由我国自行研发的树木抗风能力测试装备与方法, 基于树木力学原理, 通过将角传感器合理布置在树干上实时监测树干角度变化, 结合实时风速, 利用树木抗风能力预测分析系统, 可测算该树能够承受的最大风速或最大风力等级。以2株樟 *Cinnamomum camphora* 为研究对象, 采集了樟在风载荷作用下树干形变的角响应信息, 测得樟能够承受的最大风速和临界断裂的破坏方式及断裂位置。本方法可为树木在大风或台风来临前是否需要防护提供科学依据, 同时可为抗风性树种选择提供理论支撑。

关键词: 树木; 抗风能力; 预测方法

中图分类号: S688

文献标志码: A

文章编号: 1671-2641 (2023) 03-0090-04

收稿日期: 2022-04-24

修回日期: 2022-10-10

Abstract: In this paper, a self-developed tree wind resistance test analyzer and analysis method are introduced. Based on the principle of tree mechanics, the maximum wind speed that trees can withstand can be calculated by placing angle sensors reasonably on the tree trunk to monitor the angle change of the tree trunk under wind load in real time, combining with the real-time wind speed and using the prediction analysis software of tree wind resistance. This article takes two *Cinnamomum camphora* as research objects, collects the angular response information of their trunk deformation under wind load, and measures the maximum wind speed they can withstand, the critical damage mode, and the fracture location by the prediction analysis software. This method can provide a scientific basis for whether trees need protection before high winds or typhoons, and also provide theoretical support for the selection of wind-resistant tree species.

Key words: Trees; Wind resistance; Prediction methods

1 研究背景

自然界中树木产生断裂、倒伏的最主要原因是受到风力雪载作用, 因此对于风雪载荷承受能力的研究是树木安全性评估的重要内容。常用的评估风灾害对树木破坏的方法包括: 经验观察、统计学方法和力学方法^[1]。前期的大部分研究都是依赖于观察和统计学方法, 这些方法虽然能够定性描述风灾害的破坏程度, 但却无法说明风载荷与树木强度及稳定性之间的关系^[2], 因而对于树木断裂倒伏的风险性评估存在许多不确定性。所以, 欧洲现在开始使用力学方法来评价风灾害对树木的破坏性, 且研究内容多集中在树木的断裂破坏上^[3-5]。

树干断裂是风灾害中最常见的破坏类型, 尤其是在中龄林和成熟林中表现更为突出^[6]。树干断裂也是森林灾害研究中开展较早的内容, 在国外已有百年研究历史,

且研究工作主要集中在树干的风弯断裂上, 并对断裂发生的临界条件有一致的认识, 即在风弯矩 M_{win} 的作用下, 树干最外层的弯曲应力接近树材纤维的极限应力 σ_u 时, 树木就会发生断裂破坏。

树木倒伏是指当树木根土锚固能力小于树干抗弯折能力时, 树木在风弯矩作用下就会因根土盘固着力(即掘根阻力矩)不足而发生倒伏。我国南方沿海地区受台风影响, 树木倒伏现象特别严重, 有些地区在风害中的树木倒伏与树木断裂之比接近二比一^[7]。但无论是树木断裂还是倒伏, 从力学角度来看, 都是在强风作用下风弯矩超过了树木抗弯折力或根土盘固着力所致。

20世纪90年代前后, Mayer^[8]和Peltola^[9]基于高层建筑的风压力计算公式 $F_{wind}=0.5\rho v^2A$, 通过引入树冠阻力系数 C_d (=1-透风率), 用来计算单株树和林区边缘树木的风弯矩:

*基金项目: 国家自然科学基金面上项目: 风力雪载下的树木断裂行为与强度诊断新技术(31570715)

$$M_{wind} = F_{wind} \cdot h = 0.5 C_d \rho v^2 A \cdot h$$

该式被称为HWIND模型，式中 A 是树冠迎风面面积， h 是风载荷中心高度， v 是风速，空气密度 $\rho=1.12 \text{ g/cm}^3$ 。

时隔不久，Gardiner^[10]应用空气动力学中的对数风廓线原理，提出了计算林区非边缘树木的风弯矩公式：

$$M_{wind, max} = f_{cw} f_{edge} d \rho G \left\{ \frac{k D v_h}{\ln[(h-d)/z_0]} \right\}^2$$

该式被称为GALES模型，式中 k 是卡门常数（ ≈ 0.4 ）， d 是林区零平面位移高度， D 是树间距， h 是树高， v_h 是树冠顶端风速， G 是阵风系数， z_0 是空气动力学粗糙度， f_{cw} (>1)是树干弯曲后因树冠自重产生的附加力矩系数， f_{edge} (<1)是树木距离森林边缘相对位置系数。

HWIND模型和GALES模型是在西方具有代表性的，可用于预测树木临界破坏时最大风速的方法，由于模型的建立引入了力学分析，两者在西方被惯称为力学模型。但是仔细分析这些模型的构建过程和参数内容后，会发现其在本质上仍属于经验统计型的预测模式，虽然在形式上引用了力学概念，但其中的参数获取依然是基于以往的经验信息，并没有实现完全量化的目标^[11]。这也可以从上述模型建立者Gardiner和Peltola合作发表的研究论文^[12]中得到印证，不仅预测模型建立不易，而且对于风害等级的预测结果也需要事后通过多次调整参数值才能与实际吻合。正如Moore、Gadow等人也指出，尽管现阶段的风害预测模型研究中量化成分很高，但对于风害等级的确定仍然是基于经验方法^[13]和依赖专家的判断^[14]。所以，目前关于森林风雪灾害预测模型的研究仍处于探索阶段，模型在林业经营中的应用也只限于欧洲少数标准化人工林区。由于异地适用性差，模型在亚太地区鲜见有应用的报道。

本文介绍一种全新的预测与评估树木抗风能力的方法，其完全基于力学方法，不需要预设诸多难以取得的经验参数，而是采用现场直接测试，操作简便，结果有效。其基于邵卓平等^[15-16]研究发现的“风致树弯矩特性方程”，以及由此建立的与树干截面角度变化响应之间的关系而开发，并通过独创的算法分析，实现预测与评估树木能够承受的最大风速以及破坏方式，为树木安全防护和抗风性树种选择提供科学依据。

2 原理、装置与方法

2.1 工作原理

从树木力学角度而言，评价风载荷下立木的弯曲断裂强度和稳定性的指标分别是树干的**最大弯曲应力** $\sigma_{bole, max}$ (\leq 树材的极限应力 σ_u)，和**树木根基的倾角** $\theta_{foundation}$ (\leq 立木临界倾角 θ_u)。树木根基的倾角可以由角传感器直接

读取，而指定树段的**最大弯曲应力**则需要通过在该树段两端各安装一个角传感器来获得^[15]，其原理如图1所示，一段长度 L 、直径 D 的圆树干，两端受弯矩 M 作用而弯曲，设树段两端横截面之间产生的夹角为 $\Delta\gamma$ ， ρ 为曲率半径， ΔL 为树干弯曲变形量，则树干外侧的伸长应变为：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{(\rho + D/2)\Delta\gamma - \rho\Delta\gamma}{L} = \frac{D\Delta\gamma}{2L} \quad (1)$$

若树皮厚为 B ，则树干外周木质部的最大应变：

$$\varepsilon_{max} = \frac{(D-2B)\Delta\gamma}{2L} \quad (2)$$

因此，只要测得某段树干两端横截面之间的角度变化量，即可获得树干外周木质部的**最大应力**：

$$\sigma_{max} = E\varepsilon_{max} \quad (3)$$

其中， E 是树材的弹性模量。

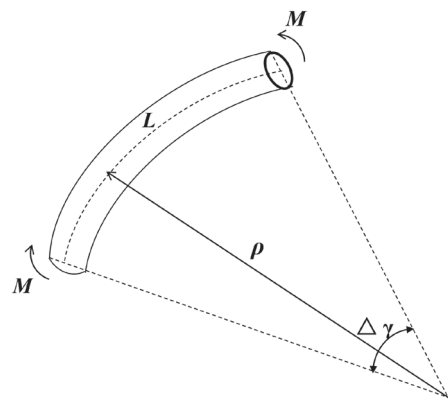


图1 树段弯曲示意图

2.2 实验装置

仪器硬件由1个主机、1个风速仪和5只微型角传感器组成，应用软件有2个：1)安装在手机上的“树木抗风仪”应用软件(APP)，用来在WIFI下监视仪器工况和输入实验参数；2)安装在电脑上的“树木抗风能力预测分析系统”。

2.3 实验方法

实验过程简便，只要在5~7级中等风力下测试30~50 min即可。风速仪通过铝镁合金伸缩杆竖立在被测树迎风方向的前方2 m左右处，高度以齐平树冠中心为宜(图2)。角传感器自带有4根细钢针，揷按在树干上即可，安装个数和安装方法则根据被测树干的高度或所需(如需要测某侧枝)，选择3~5个按图3所示编号顺序安装。测试完毕将数据文件传到电脑中，通过“树木抗风能力预测分析系统”，测算出该树能够承受的最大风速或最大风力等级。

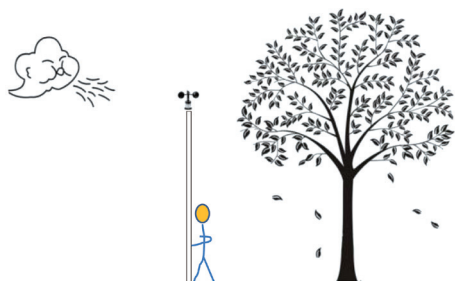


图2 风速仪安装方式示意图

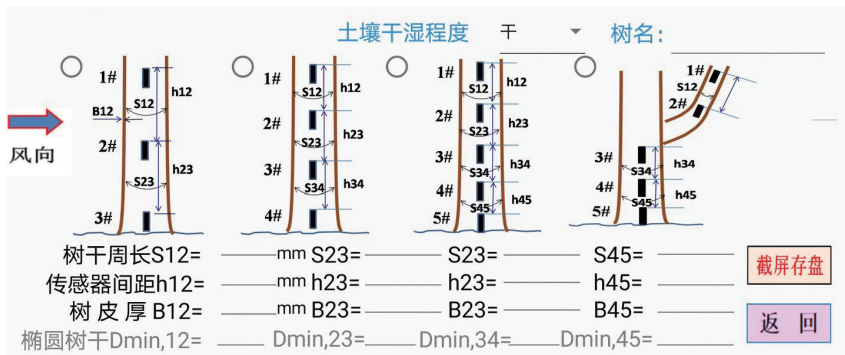


图3 传感器安装方式(手机APP界面)

3 实验与结果分析

于2021年11月7日开展实验,当天安徽省合肥市风力5级,阵风6~7级。实验样树取自杏花公园的樟 *Cinnamomum camphora* 2株,编号为樟A、樟B。樟A枝下高2 436.0 mm,树皮厚7.0 mm,树干安装5只传感器;樟B枝下高2 134.0 mm,树皮厚8.0 mm,树干安装4只传感器。传感器安装好后,打开仪器电源开关,连接仪器号局域网,打开手机“树木抗风仪”APP检查各传感器工作状态正常后,再进入参数输入界面,记录各传感器的间距 h 、树干周长 S 、树皮厚 B (图4)。仪器开机即采集,采集时长约40 min,采集到的最高风速为11.7 m/s(6级风)。

测试完毕后,将仪器数据导入树木抗风能力预测分析系统,系统通过建立风速平方与树木弯曲应变特性响应之间的关系,并关联已内置于系统中的树木临界断裂时的应变值与临界倒伏时的倾角值,诊断出树木临界破坏的最大风速、破坏方式和断裂位置。其中树木断裂应变值由笔者之前开展的实验^[17]测得,临界倾角取自文献^[12]。分析预测结果为:1)2株樟都是优先发生断裂破坏;2)樟A的临界破坏时最大风速为23.60 m/s,樟B的临界破坏时最大风速为26.93 m/s。

从本次实验的结果来看,樟的抗倒伏能力要高于抗断裂能力,这与樟主根发达、深根性好的特点有关。另外从2株样树形体来看,樟A较细高,樟B较粗矮,樟A的预测断裂位置发生在距地面高度1.31~1.82 m处,与笔者观察到樟A树干在该部位较细相吻合;樟B的预测断裂位置发生在距地面高度1.50~2.00 m处,这也与樟B树干在该部位较细相吻合。可见本实验采用的方法和装备能够非常好地适应个体差异。树木抗风断或风倒能力在不同种类及同种不同株之间都存在差异^[18-20],本文介绍的方法对于精准预测每株树的抗风能力及破坏方式具有重要意义。

此外,分析软件还提供风速平方与响应的散点图、时间序列图,以便于研究人员撰写测试报告。图5是樟A的风速平方与响应时间序列图,绿色线是风速平方变化曲线,紫色线是应变与倾角变化曲线,可见各段树干应变响应、树基倾角响应与风速平方之间存在很好的关联。

4 结论

基于树木力学原理开发的树木抗风能力预测技术与方法是一种思维创新,不需要诸多难以取得的经验参数,而是直接现场测试,即在一次中等风中采集几十分钟的

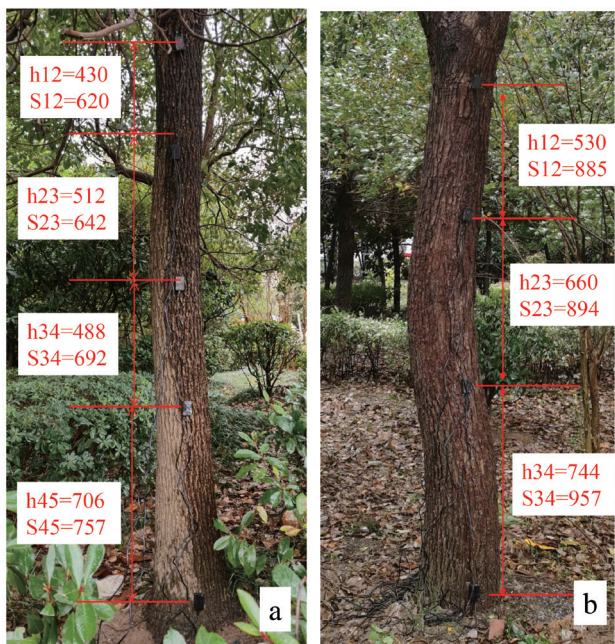


图4 A、B树干传感器安装间距与树干周长(单位:mm)

树木特性响应, 便可通过建立风速与被测树木的强度及倾角之间关系, 预测该树能够承受的最大风速, 以及临界条件下树木的破坏方式和断裂位置, 操作简便, 结果真实、有效。

基于该技术而开发的仪器也是目前国内外首款用于评估与预测城市行道树、园林和林区树木能够承受最大风力等级的专用装备, 拥有多项技术专利^[15,21-22]。这些技术及装备对于指导林业生产和防风林建设以及城市行道树的安全防护, 均有重要意义, 尤其适用于台风盛行的沿海地区树木抗风能力的评估与预测。

注: 图片均为作者自绘自摄

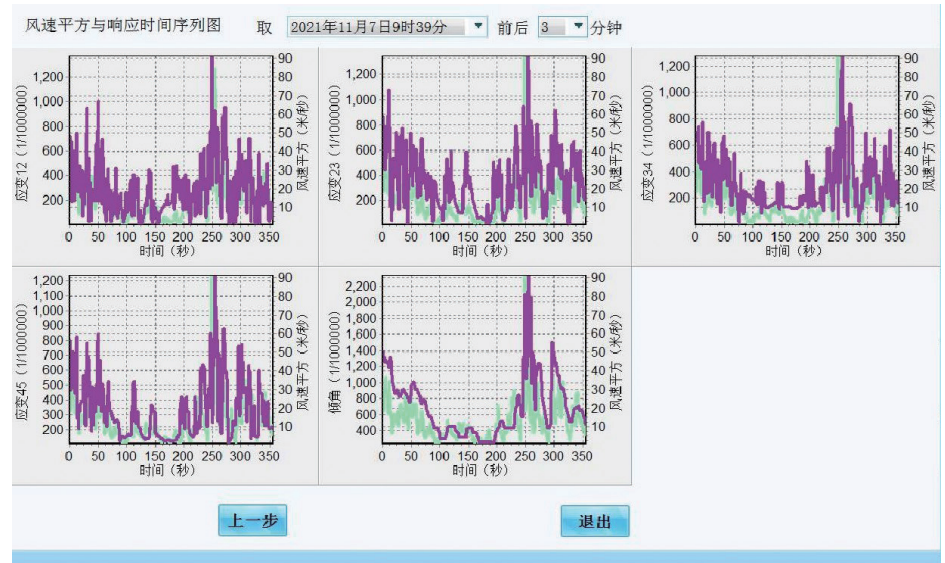


图5 风速平方与樟A各树段响应时序图

参考文献:

[1] KAMIMURAK, SHIRAIISHIN. A review of strategies for wind damage assessment in Japanese forests[J]. The Japanese Forest Society, 2007, 12 (3): 162-177.

[2] PETTY J A, SWAIN C. Factors influencing stem breakage in conifers in high winds[J]. Forestry, 1985, 58 (1): 75-84.

[3] GARDINER BA, QUINE CP. Management of forests to reduce the risk of abiotic damage - a review with particular reference to the effects of strong winds[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 135: 261-277.

[4] PELTOLA H, KELLOMÄKI S, VÄISÄNEN H, et al. 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, 1999, 29 (6): 647-661.

[5] KOHNLEU, GAUCKLER S. Vulnerability of Forests to Storm Damage in a Forest District of Southwestern Germany Situated in the Periphery of the 1999 Storm[C]//RUCK B, KOTTMEIER C, MATTHECK C, et al. Proceedings of the International Conference of Wind Effects on Trees. Germany: Lab Building, Environment Aerodynamics, Institute of Hydrology, University of Karlsruhe, 2003: 151-157.

[6] RODGERSM, CASEYA, MCMENAM C, et al. Wind and Trees: An experimental investigation of the effects of dynamic loading on coniferous trees planted on wet mineral soils[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 204-219.

[7] 朱伟华, 丁少江. 深圳园林防台风策略研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008: 10.

[8] MAYERH. Wind induced tree sways[J]. Trees, 1987, 1 (4): 195-206.

[9] PELTOLA H, KELLOMÄKI S. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage at stand edge [J]. Silva Fennica, 1993, 27 (2): 99-111.

[10] GARDINER B, QUINE C. Management of forests to reduce the risk of abiotic damage- A review with particular reference to the effects of strong winds[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 135 (13): 261-277.

[11] 孙洪刚, 林雪峰, 陈益泰, 等. 沿海地区森林风害研究综述[J]. 热带亚热带植物学报, 2010, 18 (5): 577-585.

[12] GARDINER B, KELLOMÄKI S, PELTOLA H. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 129 (1): 1-23.

[13] MOORE J. Difference in maximum resistive bending moments of Pinus radiata trees grown on arrange of soil types[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 135 (1-3): 63-71.

[14] GADOW K. Evaluating risk in forest planning models[J]. Silva Fenn, 2000, 34 (2): 181-191.

[15] 邵卓平, 杨瑞卿, 王本耀, 等. 树木抗风能力监测预测装备与方法: CN111238944A[P]. 2020-06-05.

[16] 邵卓平, 吴贻军, 黄天来, 等. 风灾害下树木强度分析的理论、方法及应用[J]. 林业科学, 2017, 53 (5): 170-178.

[17] 吴贻军. 风雪灾害下树木断裂机制及风险评估与防护[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016: 29-41.

[18] 张劲嵩, 孙龙华, 毕可. 广州市主要园林树种抗风性评价[J]. 广东园林, 2021, 43 (2): 19-23.

[19] 黄颂强, 沈海岑, 陈峰. 台风“山竹”对粤港澳大湾区城市园林树木的影响调查[J]. 广东园林, 2020, 42 (2): 26-31.

[20] 黄义钧, 何国强, 张建华, 等. 园林树木形态因子与树种抗风能力关系探讨[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42 (5): 69-79.

[21] 邵卓平, 吴贻军, 陈品. 树木力学量的全量测试方法: CN103018092B[P]. 2015-10-28.

[22] 邵卓平, 吴贻军. 树木变形无损测量方法: CN102636148B[P]. 2015-03-04.

作者简介:

吴贻军/1988年生/男/安徽池州人/博士/黄山风景区管委会园林局(黄山 245800)/高级工程师/研究方向为森林资源保护、树木力学

王福利/1987年生/女/安徽宿州人/博士/安徽农业大学林学与园林学院(合肥 230000)/副教授/研究方向为生物质材料断裂力学

(*通信作者) 邵卓平/1956年生/男/安徽合肥人/博士/安徽农业大学林学与园林学院(合肥 230000)/教授/研究方向为树木力学、树木断裂倒伏风险评估/E-mail: 15955173171@163.com