

# 林木风致动态响应特征的试验研究

周建中

(北京林业大学水土保持学院,教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室,北京 100083)

**摘 要:**首先对 1 株新疆杨进行了阻风效应试验,得出了新疆杨对降低风速及风压的效应很明显的结论;然后通过对 5 株新疆杨进行实验室条件下的模拟自然风动力加载试验,得出了新疆杨的风致动态位移及风致动态应变特征曲线;其次通过对 4 株新疆杨进行野外真实风条件下动力加载试验,得到了风致动态应变、风致动态位移、风致动态速度及风致动态加速度响应特征曲线;最后对室内和野外两种试验条件下的新疆杨动态响应特征曲线进行了对比.试验及分析表明:新疆杨树干上同一方向的上、下两测点位置的位移、速度及加速度具有明显相关性;在随机风荷载激励下,林木的外表层纤维交替处于拉压状态;随着林木高度的增加,林木的风致动态位移越大.本文对林木防风减灾及林木保护具有重要的理论意义和实用价值.

**关键词:**林木;风致动态响应;试验研究

**中图分类号:**TU312

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7930(2011)01-0064-06

土地荒漠化是中国最为严重的生态环境问题之一,目前荒漠化趋势已在局部地区得到遏制,但在一些重点荒漠化省区和经济落后地区,仍在加速扩展.“三北(西北、东北西部、华北北部)防护林建设”、京津风沙源治理等国家骨干工程的实施,使风速有所降低,沙尘天气有所下降,大气浑浊度有所降低,降尘减少,治理区的生态环境有所改善.因而营造、尤其是保护防风固沙骨干林带的工作非常重要.国内外学者对这方面的研究工作一直不断<sup>[1-7]</sup>,并取得了一些积极成果.李锋瑞<sup>[1]</sup>对科尔沁沙地人工杨树(*P. bolleana simonii*)林生态防风效应进行了研究,得出了林地对不同风向的生态防护效应明显不同、林地对同风向不同风速的减弱效应也明显不同等结论;关德新<sup>[2]</sup>等根据风洞模型实验,分析了树冠结构参数和附近风速场特征,得出了透风系数与疏透度之间符合幂函数关系等结论;NIKLAS K. J.<sup>[3]</sup>对不同风速作用下树茎干的弯矩及应力特性作了较深入的研究;ZHOU X. H., BRANDLE J. R., MIZE C. W. et al<sup>[4]</sup>对防风林的结构与风流动模式进行了研究,并提出了防风林三维空气动力结构的概念,含义和工作模式;但总的说来,目前国内外对防风固沙杨树林体系在抗风振<sup>[5]</sup>方面的研究还很不完善,防风固沙杨树林体系的固有力学特性和风致动力特性还需要研究,这一问题必将吸引越来越多学者的注意力.

## 1 新疆杨的阻风效应试验

### 1.1 防风固沙林

人工造林就是在无林或原来不属于林业用地的土地上造林.营造防风固沙林<sup>[6-7]</sup>可以有效地防止沙害.防风固沙林的主要作用在于削弱风沙流的速度,阻挡气流中剩余流沙,对气流加以“过滤”,降低扬尘量,进而改善城市的生活环境.杨树在我国分布很广,新疆杨是我国主要沙化地区的防风固沙造林树种.

### 1.2 新疆杨的阻风效应试验

新疆杨 1 号试件树高为 1 250 mm,树周长(离地高度 100 mm 处)为 50 mm,树重为 0.350 kg.该试件的迎风面及背风面的风速及风压对比分别如图 1、图 2 所示,迎风面及背风面的风速及风压均按风速

收稿日期:2009-12-14 修改稿日期:2010-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30872071)

作者简介:周建中(1970-),男,湖南衡东人,副教授,博士,主要从事混凝土结构、异形结构及振动控制、仿生结构、木结构方面的研究.

仪离地高度 100 mm、200 mm、300 mm、400 mm、500 mm、600 mm、700 mm、800 mm、900 mm、1 000 mm、1 100 mm、1 200 mm 分别测得. 迎风面离地 0.7 m 高度处最大风速为 3.54 m/s, 而背风面同一高度处的风速降低为 1.69 m/s; 迎风面离地 0.2 m 高度处风速为 0.586 m/s, 而背风面同一高度处的风速增加为 1.511 m/s; 风压沿新疆杨 1 号试件高度的变化与风速变化情况类似; 从图中可看出: 与迎风面相比, 背风面的风速降低了, 同时风压也相应降低了; 但在近地处风速及风压不但没有减少, 反而增加了. 可见, 由于树木的阻挡, 总体来说, 新疆杨对降低风速及风压的效应很明显(近地处除外).

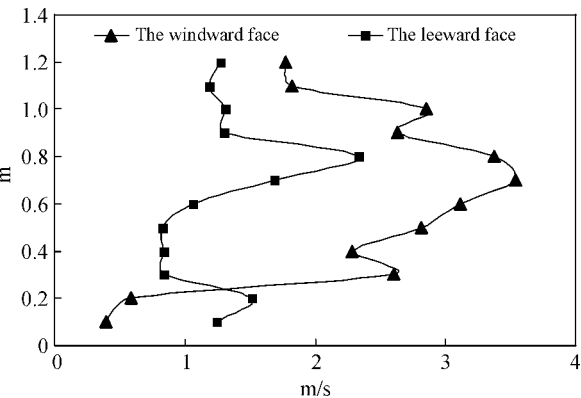


图 1 第 1 号试件迎风面及背风面风速对比图  
Fig. 1 Wind speed comparison of the first specimen between the windward face and the leeward face

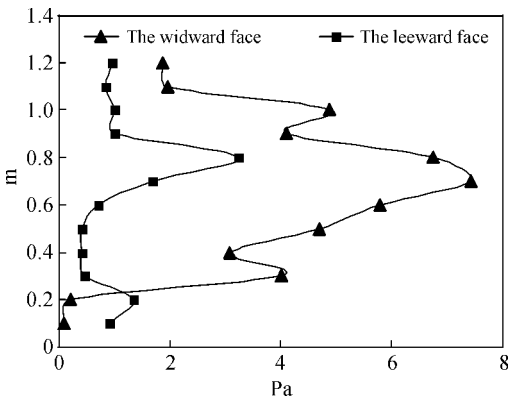


图 2 第 1 号试件迎风面及背风面风压对比图  
Fig. 2 Wind pressure comparison of the first specimen between the windward face and the leeward face

2 新疆杨的模拟自然风的动力加载试验

2.1 试验基本概况

室内模拟自然风的动力加载试验(图 3)共做了 5 根新疆杨试件, 分别命名为新疆杨第 1、2、3、5、6 号试件. 新疆杨第 1、2、3、5、6 号试件上分别贴有应变片的数量为 1、1、1、4、1 片; 每株新疆杨装设有 2 个电荷加速度计(灵敏度系数分别为  $391\text{ pC/m} \cdot \text{s}^{-2}$  和  $377\text{ pC/m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 下同); 用风速仪来测量风速及风压. 使用模拟的自然风加载, 分正向和反向加风载, 每个加载方向分 23 级控制风速档位.

安装在新疆杨第 5 号试件上的风速计距离地面的高度为 430 mm; 安装在该试件上的两个电荷加速度计距离地面的高度分别为 100 mm(第 1 测点)和 320 mm(第 2 测点); 在该试件树干上贴上沿树高度方向的应变片, 距离地面的高度分别为 160 mm(第 1 测点)、460 mm(第 2 测点)、760 mm(第 3 测点)、1 060 mm(第 4 测点).



图 3 室内试验  
Fig. 3 Lab test

2.2 新疆杨的模拟自然风的动力加载试验及其分析

新疆杨第 5 号试件的第 1 测点和第 2 测点的风致动态位移曲线对比如图 4 所示, 新疆杨第 5 号试件的第 1 测点和第 4 测点的风致动态应变曲线对比如图 5 所示. 由图 4、图 5 可知, 每个测点的应变及位移响应都是随时间的变化而变化, 反映了新疆杨在模拟自然风的动力激励下的随机振动的特性. 由图 4 可知, 第 2 测点的峰值位移比第 1 测点的峰值位移大, 第 1 测点和第 2 测点的动态位移曲线的形状基本相似. 由图 5 可知, 第 4 测点的峰值应变比第 1 测点的峰值应变大, 第 1 测点和第 4 测点的动态应变曲线的走向大致相同.

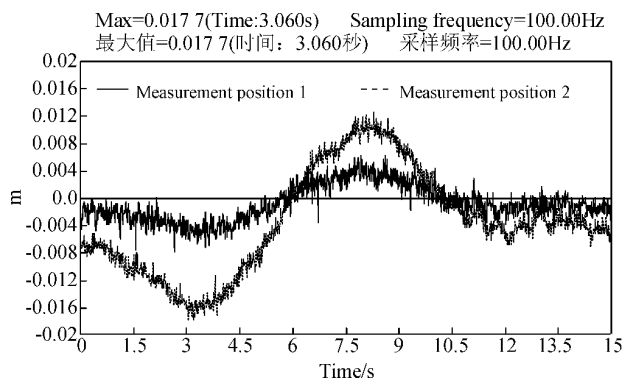


图4 第5号试件动态位移曲线对比图

Fig. 4 Comparison of dynamic displacement curve of the fifth specimen

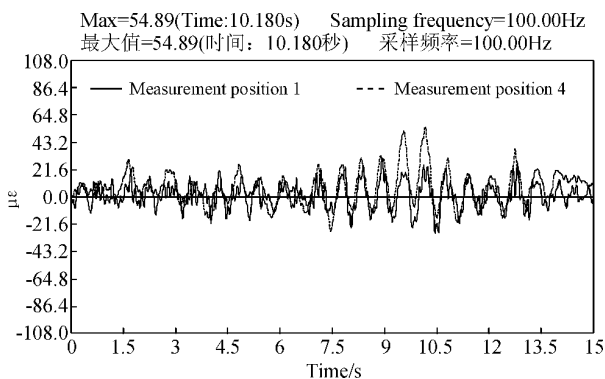


图5 第5号试件动态应变曲线对比图

Fig. 5 Comparison of dynamic strain curve the fifth specimen

### 3 新疆杨的野外真实风条件下动力加载试验

#### 3.1 试验基本概况

野外真实风条件下动力加载试验(图6)共做了4根新疆杨试件,分别命名为新疆杨第7、8、9、10号试件.新疆杨第7、8、9、10号试件上分别贴有应变片的数量为2、1、1、1片;每株新疆杨装设有2个电荷加速度计;用风速仪来测量风速及风压.

新疆杨第7号试件高度为4 820 mm.安装在新疆杨第7号试件树干上的2个电荷加速度计距离地面的高度分别为1 300 mm(第1测点)和2 400 mm(第2测点),该两测点位于新疆杨第7号试件的同一方向.在新疆杨第7号试件树干上贴上沿树干高度方向的应变片,距离地面的高度为

1 300 mm(第1测点),在该试件第一主枝上贴上沿主枝高度方向的应变片,距离地面的高度为2 140 mm(第2测点).新疆杨第7号试件共有四根主枝,其中第一主枝距离地面高度为2 140 mm,主枝长度为2 890 mm;第二主枝距离地面高度为2 260 mm,主枝长度为2 750 mm.新疆杨第7号试件上第一测点电荷加速度计安装位置与第一测点应变片安装位置垂直.

#### 3.2 新疆杨的野外真实风条件下动力加载试验及其分析

新疆杨第7号试件的第1测点和第2测点的风致动态位移曲线对比如图7所示.由图7可知:试件在平衡位置来回摆动频繁,反映了试件的随机振动特性;第2测点的动态位移比第1测点的动态位移明显大,反映了随着林木高度的增加,林木的动态位移越大,即摆动得越剧烈.新疆杨第7号试件的第1测点和第2测点的风致动态应变曲线对比如图8所示.由图8可知:在随机风荷载激励下,该试件的外表层纤维交替处于拉压状态(拉为负应变,压为正应变);其动态应变曲线反映了树干(第1测点)、主枝(第2测点)风致振动模态的相关特性.

新疆杨第7号试件的第1测点和第2测点的风致动态速度曲线对比如图9所示.由图9可知:第2测点的峰值速度比第1测点的峰值速度大,该试件动态速度曲线的形状反映了树干上的上、下两测点(第1测点、第2测点)位置的速度相关性.新疆杨第7号试件的第1测点和第2测点的风致动态加速度曲线对比如图10所示.由图10可知:第2测点的峰值加速度比第1测点的峰值加速度大,第1测点和



图6 野外试验

Fig. 6 Field test

第 2 测点的动态加速度曲线的形状基本相似,反映了树干上的上、下两测点位置的加速度相关性.

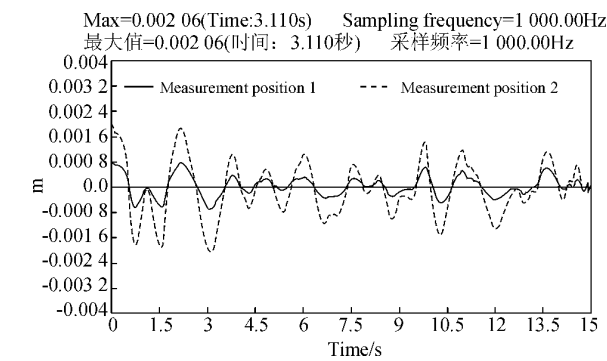


图 7 第 7 号试件动态位移曲线对比图  
Fig. 7 Comparison of dynamic displacement curve of the 7th specimen

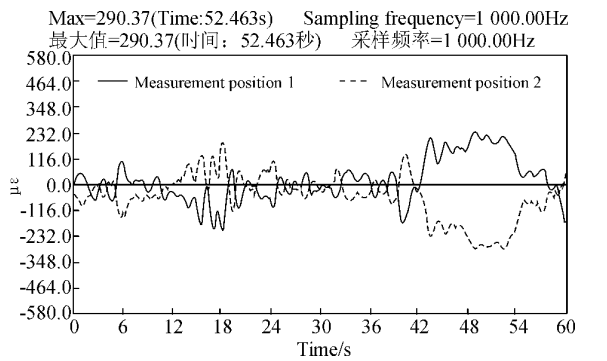


图 8 第 7 号试件动态应变曲线对比图  
Fig. 8 Comparison of dynamic strain curve of the 7th specimen

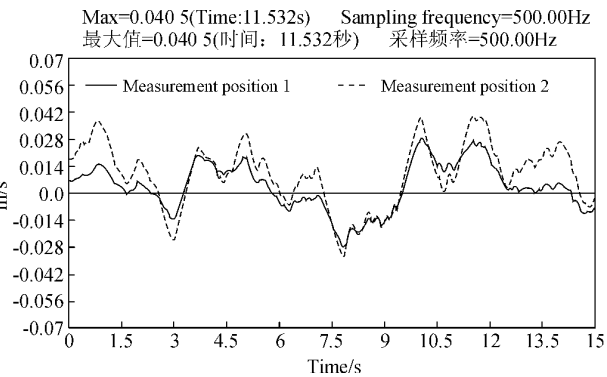


图 9 第 7 号试件动态速度曲线对比图  
Fig. 9 Comparison of dynamic velocity curve of the 7th specimen

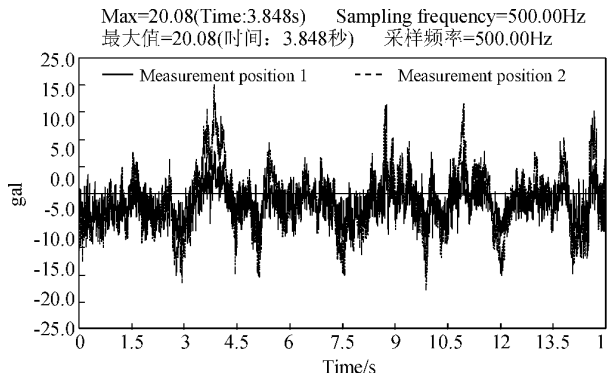


图 10 第 7 号试件动态加速度曲线对比图  
Fig. 10 Comparison of dynamic acceleration curve of the 7th specimen

4 新疆杨在室内和野外两种试验条件下的动态响应特征曲线的对比及其分析

4.1 对比试件的基本概况

在室内模拟自然风的动力加载试验条件下,对新疆杨 6 号试件进行风致动力试验.该试件高度为 1 900 mm;安装在试件树干上的 2 个电荷加速度计距离地面的高度分别为 380 mm(第 2 测点)和 950 mm(第 1 测点);在试件树干上贴上沿树高度方向的 1 片应变片,距离地面的高度为 570 mm;用风速仪来测量风速及风压;处于室外环境试验条件下新疆杨 7 号试件的有关参数详见 3.1,在此不在赘述.

4.2 新疆杨在室内和野外两种试验条件下的动态响应特征曲线的对比及其分析

新疆杨第 6 号与第 7 号试件(同一树种,均为新疆杨)的风致动态位移曲线(同一时长,均为 15 秒)对比如图 11 所示.由图 11 可知:室内和野外两种试验条件下的试件都在其平衡位置来回摆动,与室内模拟自然风试验条件下的试件相比,野外试验条件下的试件在其平衡位置的摆动剧烈得多,这在一定程度上反映模拟自然风跟野外真实风之间存在不少差异.新疆杨第 6 号与第 7 号试件(同一树种,均为新疆杨)风致动态应变曲线(同一时长,均为 25 秒)对比如图 12 所示.由图 12 可知:室内和野外两种试验条件下的试件的外表层纤维交替处于拉压状态,与野外试验条件下的试件相比,本次室内模拟自然风试验条件下的试件的外表层纤维交替处于拉压状态更频繁,这在一定程度上反映了试件上的应变片的

粘贴高度、方向及位置等存在不少差异,与新疆杨第7号试件相比,新疆杨第6号试件的风致动态位移较大,而风致动态应变却较小,但这一对比并非普遍现象,因为一方面是由于新疆杨第6号与第7号试件的高度,室内和野外两种试验条件,电荷加速度计的安裝高度、方向及位置,应变片的粘贴高度、方向及位置等许多因素存在相当大的差异;另一方面也是由于室内模拟自然风试验条件下新疆杨第6号试件的该动态位移曲线的风速控制档位为最高的23级,电荷加速度计处于迎风面或背风面,但应变片却粘贴在试件的侧面,而不处于迎风面或背风面。

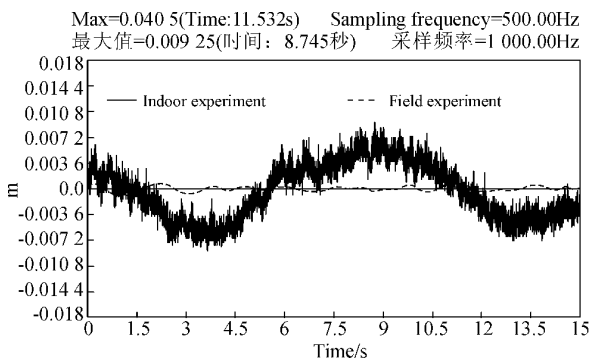


图11 第6号与第7号试件动态位移  
曲线对比图

Fig. 11 Comparison of dynamic displacement curve between the 6th specimen and the 7th specimen

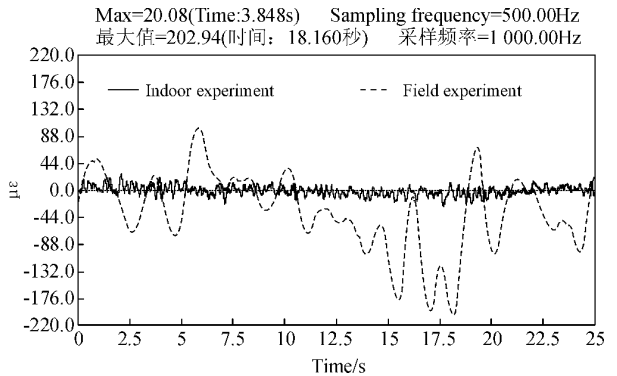


图12 第6号与第7号试件动态应变  
曲线对比图

Fig. 12 Comparison of dynamic strain curve between the 6th specimen and the 7th specimen

## 5 结 论

(1)研究表明:在林木上可以安装应变片及电荷加速度计,通过安装的应变片及电荷加速度计可以测得林木在随机风荷载作用下的动态响应,这将为林木保护提供必要的技术支持。

(2)在随机风荷载激励下,林木的外表层纤维交替处于拉压状态。

(3)新疆杨的动态应变曲线反映出了树干、主枝风致振动模态的相关特性。

(4)风力作用下的林木振动表现出典型的随机振动特性;随着林木高度的增加,林木的风致动态位移越大,即摆动得越剧烈。

(5)新疆杨试件树干上同一方向的上、下两测点位置的位移、速度及加速度具有明显相关性。

(6)林木的动态响应特征跟林木高度、林木胸径、固土根系、试验条件、风载强度等诸多因素有关,需要作进一步的深入研究。

## 参考文献 References

- [1] 李锋瑞,张 华,赵丽娅,等. 科尔沁沙地人工杨树(*P. bolleana simonii*)林生态防风效应研究[J]. 水土保持学报, 2003,17(2):62-66.  
LI Feng-rui, ZHANG Hua, ZHAO Li-ya, et al, Ecological effect of artificially established poplar forest against wind in horqin sandy land of inner mongolia[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003,17(2):62-66.
- [2] 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 De-xin, ZHU Ting-yao. 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.
- [3] NIKLAS K J. Computing factors of safety against wind-induced tree stem damage[J]. Journal of experimental botany

- ny 2000, 51 (345):797-806.
- [4] ZHOU X H, BRANDLE J R, MIZE C W, et al. Three-dimensional aerodynamic structure of a tree shelterbelt: Definition, characterization and working models[J]. Agroforestry systems, 2004, 63:133-147.
- [5] 张相庭. 结构风工程—理论·规范·实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.  
ZHANG Xiang-ting. Structural wind engineering-theory·code·practice[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [6] 姚延涛, 杨秀清, 杜娟, 等. 林学概论[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2008.  
YAO Yan-tao, YANG Xiu-qing, DU Juan, et al. Forestry Panorama [M]. Beijing: Chinese Agriculture Science & Technology Press, 2008.
- [7] 张建国, 李吉跃, 彭祚登. 人工造林技术概论[M]. 北京:科学出版社, 2007.  
ZHANG Jian-guo, LI Ji-yue, PENG Zuo-deng. Introduction to afforestation technology [M]. Beijing: Science Press, 2007.

## Study on characteristics of wind-induced dynamic response of forest

ZHOU Jian-zhong

(Key laboratory of soil and water conservation & desertification combating, Ministry of Education,  
School of soil and water conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Firstly, the wind-resistance effect test was carried out with one *P. bolleana* in this article, and a conclusion was arrived at that *P. bolleana* was obviously effective to reduce wind speed and wind pressure. And then through dynamic loading test of five *P. bolleana* under laboratory condition simulating natural wind power, the characteristic curves of wind-induced dynamic displacement and wind-induced dynamic strain were acquired. In the dynamic loading test of four *P. bolleana* under the condition of true wind power outdoors, characteristics curves of wind-induced dynamic strain, wind-induced dynamic displacement, wind-induced dynamic speed and wind-induced dynamic acceleration response were also obtained. Finally, a comparison was carried out on the dynamic response characteristic curves of *P. bolleana* under both indoor and field test conditions. Test and analysis showed that displacement, velocity and acceleration had obvious pertinence on the upper and lower measuring point position in the same direction of stem of *P. bolleana*, and in the random wind load excitation, the forest fibers of outer surface were in alternating tension-compression state, and with the increase in forest height, wind-induced dynamic displacement of forest was larger. This article has the important theoretical significance and practical value to wind resistance, disaster alleviation and protection of forest.

**Key words:** forest; wind-induced dynamic response; experimental study