

基于动力学的钢丝绳断丝数检测方法初探

修树东¹, 倪忠进¹, 姚文斌¹, 应华香²

(1. 浙江林学院 工程学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江省天和建筑材料集团有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 钢丝绳是由许多优质碳素钢丝捻制成股, 再由若干股围绕绳芯捻制成绳。由于钢丝绳结构的特殊性决定了它具有较好的力学性能, 同时在工作可靠性和结构多样性等方面也表现出独特的优点, 被广泛应用于众多工程领域。钢丝绳的设计、制造、使用和维护等方面还存在着相当多的技术难题, 甚至还不能给出钢丝绳在使用过程中真正意义上的安全系数, 以至于钢丝绳工程结构时常出现意外安全事故。针对钢丝绳无损检测问题展开了研究, 用弦振动方程建立钢丝绳断丝数检测方程, 利用该方程对悬索钢丝绳的断丝数进行了探索性试验研究。结果表明, 钢丝绳断丝数较少, 负载较小时, 对基频的影响较小; 当钢丝绳断丝数较多, 负载较大时, 对基频的影响较为明显。因此, 该方法为钢丝绳无损检测技术提供了一种新的检测手段, 具备一定的可行性。图 4 表 1 参 11

关键词: 林业工程; 钢丝绳; 断丝; 检测; 动力学

中图分类号: S776.03 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2009)04-0461-06

Dynamics-based testing method of wire rope's broken wires

XIU Shu-dong¹, NI Zhong-jin¹, YAO Wen-bin¹, YING Hua-xiang²

(1. School of Engineering, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Tianhe Building Materials Group Co., Ltd., Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: The strands are twisted with high quality carbon steel strings and then a number of strands turn around the core to a wire rope. Due to its special structure as well as its unique advantages, a wire rope has better ability in mechanism reliability and structural diversity. Therefore, wire ropes are widely used in various engineering fields, but there are still a lot of technical problems regarding design, manufacturing, usage and maintenance. Even there are no certain safety factors given in the process of application so that it turns out accidents when it comes to structural problems. There were some researches on the issue of non destructive testing (NDT) of wire ropes in this paper, according to the string vibration equation; a model of testing wire rope's broken wires was established. And an exploratory experiment was made by this equation. The results showed that there was a little influence on fundamental frequency. When the number of wire rope broken wires was less and the loads was smaller. And a greater influence on fundamental frequency, when the number of wire rope broken wires was larger and the loads is bigger. Therefore, this method was certain feasible, and provided a new nondestructive testing means for wire ropes. [Ch, 4 fig. 1 tab. 11 ref.]

Key words: forest engineering; wire rope; broken wires; test; dynamics

钢丝绳是工程中应用极为广泛的一种挠性构件, 在煤炭、冶金、交通、运输、建筑和旅游等国民经济各主要行业和部门得到广泛应用。在钢丝绳的使用过程中, 由于疲劳、磨损和锈蚀等原因而出现断丝, 其损伤程度及承载能力直接关系到设备及人身安全^[1-2]。因此, 准确测量钢丝绳的张力和损伤

收稿日期: 2008-12-08; 修回日期: 2009-04-09

基金项目: 浙江省教育厅资助项目(20060655)

作者简介: 修树东, 副教授, 硕士, 从事机械制造及自动化和森林工程及自动化等研究。E-mail: sdxiu@zjfc.edu.cn

程度至关重要。用动测法测定钢丝绳张力在国内外众多文献中已经有较多的报道^[3-6]。该方法应用试验模态分析技术，首先利用实测数据识别钢丝绳的频率，然后根据其两端的受力同频率之间的数学关系换算得到张力，是一种间接测量方法。动测法测量张力误差可以控制在5%以下，测量精度高，适用于已经或者正在张拉的钢丝绳的张力测定。钢丝绳损伤检测是钢丝绳安全运行的重要保证，同时也是判断钢丝绳报废与否的重要手段。目前，国内外普遍采用霍尔元件检测法和感应线圈检测法对钢丝绳表面损伤进行定性无损检测^[7-8]，但由于技术上无法克服的缺陷，尚不能对钢丝绳的内外损伤进行准确定量检测。综合考虑动测法测量张力的精确性和操作方便性，对基于动力学钢丝绳断丝检测方法作了一些探索性研究，为钢丝绳无损检测提出了新的思路和新方法。

1 钢丝绳自由振动基本方程及张力解

由弦振动理论可知，钢丝绳在张紧的状态下，其自由振动方程为^[4]：

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0。 \quad (1)$$

式(1)中， x 为沿钢丝绳方向坐标， $u(x, t)$ 为钢丝绳上各点在时间 t 的横向位移； E 为材料的弹性模量， I 为钢丝绳的截面惯性矩， EI 为钢丝绳的抗弯刚度； T 为钢丝绳拉力； ρ 为钢丝绳的线密度。

假设钢丝绳的边界条件为两端铰接，则式(1)中张力 T 的解为：

$$T = \frac{4\rho L^2 f_n^2}{n^2} - \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}。 \quad (2)$$

式(2)中， n 为钢丝绳自振频率的阶数， $n = 1, 2, 3, \dots, L$ ； f_n 为钢丝绳的第 n 阶自振频率； L 为钢丝绳的计算长度。

如果忽略钢丝绳弯曲刚度的影响，式(2)变为：

$$T = \frac{4\rho L^2 f_n^2}{n^2}。 \quad (3)$$

从式(3)可以看出，对同根钢丝绳，张力一定时，其自振频率的频谱是等间距的，且间距等于1阶自振频率 f_1 。则有：

$$f_{n+1} - f_n = f_1。 \quad (4)$$

式(3)又可写成：

$$T = 4\rho L^2 f_1^2。 \quad (5)$$

从式(5)不难发现，张力的大小与线密度 ρ ，跨度 L 和基频 f_1 相关。综合考虑各参数的关系，不难发现，在役钢丝绳股内断丝后对跨度基本不存在影响，同时，对钢丝绳的张紧弦结构也未见破坏，那么仅与线密度和固有频率有数学上的关系。若钢丝绳断丝后可见在役钢丝会相应减少，导致了在役钢丝绳的线密度 ρ 会相应降低。由式(5)建立如下的数学关系：

$$T = 4 [\rho + \rho(n)] L^2 f_{1d}^2。 \quad (6)$$

故有：

$$\rho(n) = \frac{T}{4L^2 f_{1d}^2} - \rho。 \quad (7)$$

式(7)中 $\rho(n)$ 为以断丝数 n 为变量的参数方程，由于断丝导致了钢丝绳截面面积和在役容重的减少。 f_{1d} 为断丝钢丝绳的一阶固有自振频率。

2 钢丝绳张力测试台及测试系统

2.1 试验台结构及工作原理

为使试验台能够满足多规格、大张力和工作空间不受限等检测条件的需要，自行设计了一种新型钢丝绳张力标定试验台。该试验台由张拉系统、夹紧装置、测试台架和传感器系统等部分组成(图1)^[9]。该试验台跨距为4 m，钢丝绳采用油压千斤顶加载，两端用自制的夹具夹紧，最大张力为80 t。能对长度4~6 m，直径不大于60 mm的钢丝绳试样实行张拉试验研究。加载端由小车支撑，在千斤

顶与小车之间串接压力传感器，并通过该压力传感器对所要使用的钢丝绳张力传感器进行标定。试验台首先按要求建好混凝土地基，以支撑试验台并保证工作空间不受限制。

张拉系统由 1 台液压油泵、三位四通阀及油压千斤顶等组成。为保证加压的稳定，可采用 ZB4-500 型电动油泵。其优点在于加载中张拉与顶压可同时进行，不另行卸装油管。油压千斤顶则使用与 ZB4-500 型电动油泵相配套的 YCW60B 型轻量化穿心式通用千斤顶。采用自行设计的夹紧装置，使得夹紧力远大于设计张拉力。为了直接了解加载大小，在张拉千斤顶与小车之间串联一压力传感器，这样就能通过与压力传感器相匹配的二次仪表来直接读出钢丝绳的张力。本实验装置采用 SC1000 型压力传感器，其测量范围达 100 t，误差小于 1%，数显手动调零。通过压力传感器即可测定钢丝绳的实际张拉力。不难发现，利用本实验系统中不用考虑垂度对钢丝绳张力的影响。

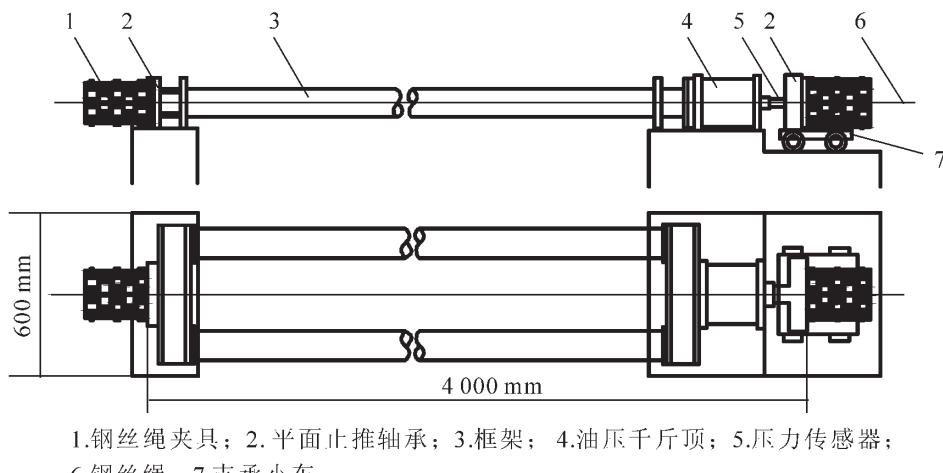


图 1 张力测试试验台示意图

Figure 1 The sketch of wire rope tensile test-bed

2.2 测试系统

本实验测试系统采用北京东方振动和噪声技术研究所的 INV303 智能采集与分析系统。INV303/306 型智能信号采集和处理分析系统是用通用微机，通过“东方科卡”和“DASP”(达世普)、PDB 等大型软件实现的微机自动测试分析仪，集数据采集、信号处理、动力修改与响应计算和多功能分析等于一体。测试硬件连接如图 2 所示。

DASP 是一套运行在 Windows 系统平台上多通道信号采集和实时分析软件。该软件具备多功能示波技术及虚拟仪器库，同时，DASP 实现了不间断海量数据采集和采样过程随时中止采样的功能，真正实现了“磁带机”的功能，并能实时存储数据及显示时域波形或者频谱。DASP 专业版还提供了多种采样模式。DASP 提供了全面的分析手段，包括幅域、时域、频域和其他方面的多种方法。

3 试验方法与结果分析

3.1 试验准备

以 6 个圆股，每股外层丝 12 根，中心钢丝外捻制 2 层钢丝，纤维绳芯的圆股钢丝绳($6 \times 19 + FC$)作为试验对象，钢丝绳公称直径为 28 mm，线密度 ρ 为 $2.71 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ ，跨度 L 为 4 m。

为了减少信号丢失，拾振器采用受环境影响较小、高分辨率、高精度和超低频的 891 型传感器，

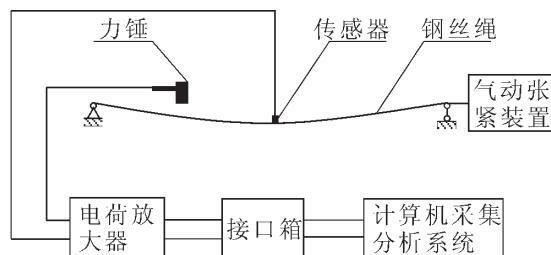


图 2 测试系统硬件连接图

Figure 2 The drawing of device attachment of test system

铰接于钢丝绳垂直方向，且尽可能地布置在钢丝绳的中间位置。因为靠近钢丝绳的中部其低频成分占主导，端部高频成分占主导，又由于悬索钢丝绳的振动以低频为主，且受结构阻尼影响较小，所以使用低频部分分析钢丝绳的自振频率，误差相对较小。本试验采用定量测量为主。

3.2 信号采集与处理

信号采集是将连续模拟信号转变为离散数字信号的过程。信号采样将产生所谓频率混迭的问题，从而导致采样信号的偏差误差。为了减少该类误差，首先要在采样之前通过低通滤波器对模拟信号进行抗混滤波，防止采样后不必要的高频成分混迭到低频中；其次，采样频率一般选取所关心的最高频率的3~4倍以上。本试验选取的采样频率为300 Hz。

在动态信号处理方法中的核心技术就是离散傅立叶变换(DFT)，但由于悬索钢丝绳在试验环境下受到人为因素和环境的随机激励作用下使得钢丝绳的振动响应变成为一种非确定性的振动响应，并且无法用确定的函数描述。由于傅氏变换是线性变换，对于均值为0的单个平稳随机信号，其样本的频谱平均值为0。因此，对于悬索钢丝绳这一特殊的研究对象，往往需通过对自功率谱密度分析，可得到能量最大且受环境干扰最小的某几阶频率，由此得到较为准确的基频。时域信号和信号分析结果如图3所示。

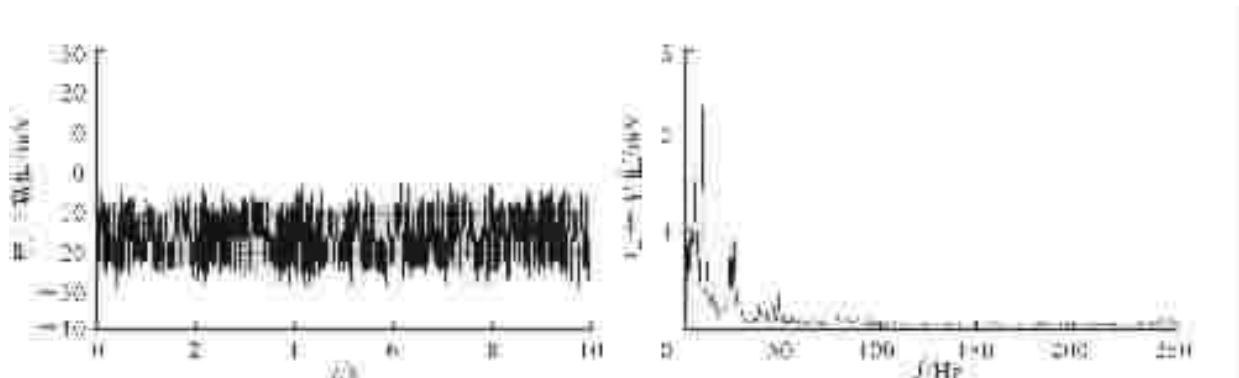


图3 钢丝绳随机振动信号图及自谱分析图

Figure 3 The draft of wire rope random vibration signal and power spectrum density analysis result

3.3 测试结果分析

由于实验室条件的局限性和钢丝绳断裂的复杂性，不可能完全模拟实际在役钢丝绳的断丝情况，本实验采用人为破坏造成断丝来模拟在役钢丝绳的断丝。同时，由GB/T 5972—2006测算可知，在长度范围 $\leq 30d$ (d 为公称直径)，该钢丝绳最大允许外层钢丝断裂数为12根。并考虑 $6 \times 19 + FC$ 的圆周对称性，故分别采用对称截断钢丝3, 6, 9, 12根。综合安全因素、及GB/T 5972—2006与MT/T 970—2005相关钢丝绳报废的有关标准等，在进行破坏性实验时，仅以20, 40和60 kN负载做探索研究，每种不同工况进行10次，剔除奇异点，再求得基频的平均值(表1)。

表1 20, 40, 60 kN 负载时断丝数及一阶固有频率

Table 1 The relation of broken wires and fundamental frequency in 20, 40, and 60 kN loads

断丝数/根	20 kN		40 kN		60 kN	
	基频 f_{1d} /Hz	$\rho(n)/(kg \cdot m^{-1})$	基频 f_{1d} /Hz	$\rho(n)/(kg \cdot m^{-1})$	基频 f_{1d} /Hz	$\rho(n)/(kg \cdot m^{-1})$
0	10.82	0	15.53	0	18.66	0
3	10.87	-0.065 2	15.61	-0.145 1	18.87	-0.077 1
6	11.23	-0.232 0	16.87	-0.513 9	20.10	-0.389 5
9	11.79	-0.461 8	18.11	-0.804 4	23.35	-0.990 5
12	12.21	-0.613 8	19.62	-1.086 4	26.78	-1.402 8

表 1 显示了 20, 40 和 60 kN 负载时钢丝绳断丝数 n 与平均基频及公式(7)求得的 $\rho(n)$ 。图 4 为 20, 40 和 60 kN 负载时断丝数 n 和 $\rho(n)$ 的一次、二次和三次拟合曲线。不难发现，一、二次拟合多项式与型值点之间存在较大的误差，三次拟合多项式与型值点之间的拟合关系就比较理想了。

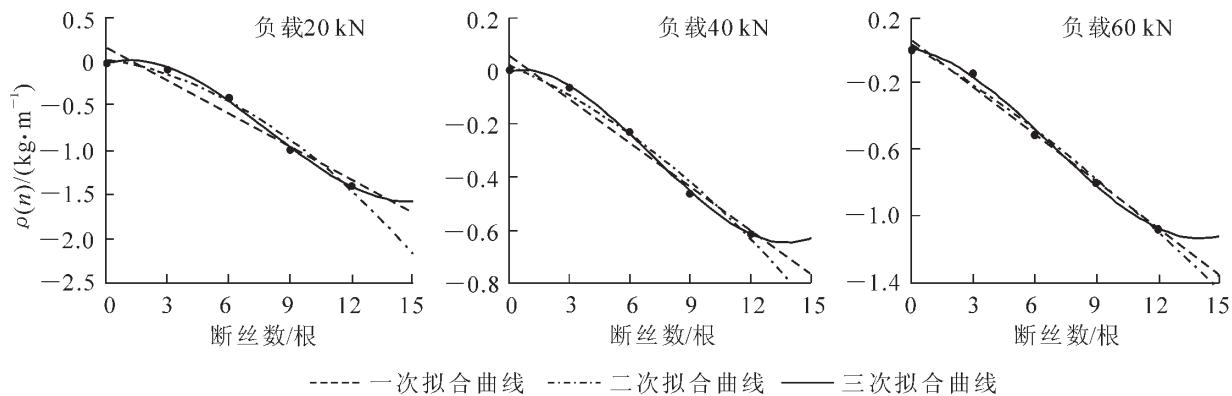


图 4 20, 40, 60 kN 负载时断丝数 n 与 $\rho(n)$ 的拟合曲线

Figure 4 The fitting curved shape of n and $\rho(n)$ in 20, 40, 60 kN loads

当负载为 20 kN 时，其三次拟合多项式为：

$$\rho(n) = 0.0006 n^3 - 0.0118 n^2 + 0.0113 n - 0.0015. \quad (8)$$

当负载为 40 kN 时，其三次拟合多项式为：

$$\rho(n) = 0.0007 n^3 - 0.0145 n^2 + 0.0203 n - 0.0053. \quad (9)$$

当负载为 60 kN 时，其三次拟合多项式为：

$$\rho(n) = 0.0013 n^3 - 0.0312 n^2 + 0.0687 n - 0.0076. \quad (10)$$

4 结论与讨论

钢丝绳断丝数与 $\rho(n)$ 三次拟合多项式较为理想；当钢丝绳断丝数较少，负载较小时，对基频的影响较小；当钢丝绳断丝数较多，负载较大时，对基频的影响较为明显。再者，钢丝绳的失效形式虽然种类繁多，但最终均表现为断裂失效^[10-11]。国内外众多的钢丝绳报废标准都把断丝检测作为判断钢丝绳是否报废的重要标准之一。由此可见，以动力学作为检测钢丝绳断丝数这一方法具有一定的可行性，为钢丝绳的无损检测提供了一种新的检测手段。

作为一种新的钢丝绳无损检测方法，需得进一步采集不同类型钢丝绳损伤力学参数样本，然后得到更为一般的数学模型，方可成为公认的成熟的检测手段，并应用于工程实际。

参考文献：

- [1] 蔡红梅, 刘启茂. 钢丝绳断丝检测技术[J]. 研究与开发, 1989 (4): 9–14.
CAI Hongmei, LIU Qimao. Technology on testing broken wires in steel rope[J]. Res Dev, 1989 (4): 9–14.
- [2] 张晓春, 刘春生. 钢丝绳断丝检测技术的研究[J]. 煤矿机械, 2001 (10): 20–21.
ZHANG Xiaochun, LIU Chunsheng. Research of technology on testing broken wires in steel rope[J]. Coal Mine Mach, 2001 (10): 20–21.
- [3] 陈文革, 蔡键. 斜拉桥索力的测试方法[J]. 华东公路, 1998 (1): 61–63.
CHEN Wenge, CAI Jian. Slanting bridge force testing methods [J]. East China Highw, 1998 (1): 61–63.
- [4] 林志宏, 徐郁峰. 频率法测量斜拉桥索力的关键技术[J]. 中外公路, 2003, 23 (5): 1–4.
LIN Zhihong, XU Yufeng. Key technology of measuring the cable tensile force of cable-stayed bridges with frequency method [J]. J China & Foreign Highw, 2003, 23 (5): 1–4.
- [5] 王卫锋, 韩大建. 斜拉桥的索力测试及其参数识别[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2001, 29 (1): 18–21.
WANG Weifeng, HAN Dajian. The cable tension measurement and parameter identification for cable-stayed bridge [J].

- J South China Univ Technol Nat Sci*, 2001, **29** (1): 18 – 21.
- [6] 苏成, 徐郁峰, 韩大建. 频率法测量索力中的参数分析与索抗弯刚度的识别[J]. 公路交通科技, 2005, **22** (5): 75 – 78.
SU Cheng, XU Yufeng, HAN Dajian. Parameter analysis and identification of bending stiffness of cables during tension measurements by frequency method [J]. *J Highw Transp Res Dev*, 2005, **22** (5): 75 – 78.
- [7] 曹印妮, 张东来, 徐殿国. 钢丝绳定量无损检测现状[J]. 无损检测, 2005, **27** (2): 91 – 95, 106.
CAO Yinni, ZHANG Donglai, XU Dianguo. The state-of-art of quantitative nondestructive testing of wire ropes [J]. *Non-destruct Test*, 2005, **27** (2): 91 – 95, 106.
- [8] 张彦平, 李建朝, 杨旭, 等. 基于虚拟仪器技术的钢丝绳无损定量检测系统设计[J]. 国外电测量技术, 2008, **27** (5): 23 – 26.
ZHANG Yanping, LI Jianchao, YANG Xu, et al. Design of wire rope nondestructive quantitative detection system based on virtual instrument technology [J]. *Foreign Electron Meas Technol*, 2008, **27** (5): 23 – 26.
- [9] 张蔚, 姚文斌. 钢丝绳张力传感器标定试验台的研制[J]. 农机化研究, 2004 (5): 148 – 150.
ZHANG Wei, YAO Wenbin. Manufacture of wire rope tension sensor demarcating test-bed [J]. *J Agric Mech Res*, 2004 (5): 148 – 150.
- [10] 姚戈, 尹万全. 架空索道钢丝绳断裂原因分析[J]. 金属制品, 2002, **28** (1): 47 – 50.
YAO Ge, YIN Wanquan. Fracture reason analysis of wire rope for over-ground ropeway [J]. *Steel Wire Prod*, 2002, **28** (1): 47 – 50.
- [11] 修树东, 倪忠进, 姚文斌, 等. 钢丝绳失效机理的研究[J]. 起重运输机械, 2008 (6): 10 – 14.
XIU Shudong, NI Zhongjin, YAO Wenbin, et al. Study of failure mechanisms in wire rope [J]. *Hoist Convey Mach*, 2008 (6): 10 – 14.

周国模提出通过城市森林建设低碳城市

2009年5月7日, 第6届中国城市森林论坛在浙江省杭州市举行。浙江林学院校长周国模教授应邀出席并作主题发言, 提出城市森林是实现低碳城市的主要途径。

周国模在报告中分析, 城市比农村人均消耗的资源在3.5倍以上, 城市化也给世界带来了不少新的问题和挑战。他提出, 低碳城市的建设主要有2个着力点: 一是找准产业结构; 二是要提倡绿色交通, 低碳消费, 增加碳汇。就我国目前的技术水平、产业结构和经济发展阶段来说, 要大幅度减少二氧化碳排放量, 将对经济发展会造成影响。而森林是陆地生态系统最大的碳库, 城市森林可以直接吸收城市中排放的碳; 同时, 可以通过减缓热岛效应, 减少碳的排放。因此, 他提倡从建设低碳城市的视角重新审视和认识城市森林, 强调城市森林不能只停留在美化城市的功能, 而且还应在建设低碳城市中发挥其碳汇功能。在经济发展和低碳经济出现矛盾的今天, 建设城市森林和建设低碳城市可以实现两全其美。城市森林建设中, 要尽量营造高吸碳的树种。可以预见, 未来城市森林在低碳城市建设中占有重要的地位。

中国城市森林论坛由国家林业局、全国政协人口资源环境委员会、浙江省人民政府和经济日报社共同主办。本届论坛的主题是“城市森林, 品质生活”。

蒋文伟 李燕