

文章编号: 1001-4888(2013)05-0642-07

# SPF 规格材弹性模量的频率法测试及其评价\*

王正<sup>1</sup>, 王智恒<sup>1</sup>, 饶鑫<sup>2</sup>, 刘斌<sup>1</sup>, 杨燕<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学 木材工业学院, 江苏南京 210037; 2. 江苏农林职业技术学院, 江苏镇江 212400)

**摘要:** 本文首先借助模态试验验证了文中提出的试验装置对试件实现了自由支承, 然后用瞬态激励测试了试件的一阶固有频率, 并推算出 SPF 规格材的弹性模量。根据 GB50005—2003《木结构设计规范》, 评价了这批 SPF 规格材的弹性模量达 II c 级要求的概率为 96.3%。瞬态激励频率法具有快速、简便、重复性好、精度高的优点。该方法对轻型木结构行业的检测工作具有一定的应用价值。

**关键词:** 云杉—松木—冷杉(SPF); 弹性模量; 频率; 模态; 评价

**中图分类号:** TS643      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-12-122

## 0 引言

木材工业中, 锯材作为一种结构用材, 须进行弹性模量(MOE)等力学性能指标检测。国外木材工业从 1985 年开始进行无损检测, 其中弹性模量是检测的重要参数, 先后应用超声波技术、应力波、横向振动频率法的检测手段, 获得了较多的研究成果。而在我国木材加工领域, 利用应力波、横向振动等无损检测技术对锯材的质量分等研究起步较晚, 仅取得了小试阶段成果, 亟需加大推广与应用力度。

SPF 规格材是轻型木结构建筑用材中的主材, 其弹性模量  $E$  是衡量该材料产生弹性变形难易程度的指标。因此, 用振动法<sup>[1]</sup>实测 SPF 规格材弹性模量并进行分析研究尤为重要。为加强外购 SPF 规格材的验收检验工作, 笔者在南京北美木屋有限公司现场将该企业工程用的一批 SPF 规格材作为试件, 采用弹性绳垂直自由悬挂方式的支承结构实现自由梁, 模态试验<sup>[2]</sup>结果验证了实现自由梁的精度; 再利用瞬态激励频率法, 通过测自由试件一阶弯曲固有频率, 得到它的弹性模量值, 并根据 GB50005—2003《木结构设计规范》<sup>[3]</sup>等级水平的设计要求对其 SPF 规格材进行评价, 这对提高木结构建筑行业的检测水平有一定价值。

## 1 瞬态激励频率法测量 SPF 规格材弹性模量

### 1.1 测试原理

根据梁横向弯曲理论, 自由梁的一阶弯曲固有频率:

$$f_1 = 1.02803 \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

当试件尺寸给定和试件材质密度已知的条件下, 弹性模量  $E$  可由自由梁的一阶弯曲固有频率  $f_1$  推算得到:

\* 收稿日期: 2012-09-23; 修订日期: 2013-01-26

基金项目: 2012 年江苏省苏北科技发展计划科技型企业技术创新资金项目(BC2012416)资助。2012—2013 年江苏高校优势学科建设工程项目资助(PAPD, 164020639)

通讯作者: 王正, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 木材科学与技术、机械设计与理论。E-mail: wangzheng63258@163.com

$$E = 0.9462 \frac{\rho f_1^2 L^4}{h^2} \quad (2)$$

式中:  $E$  为试材动态弹性模量 (Pa);  $\rho$  为试件气干密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $f_1$  为试件基频 (Hz);  $L$  为试件长度 (m);  $h$  为试件厚度 (m)。

另外,为实测本批 SPF 试件的气干密度,依据 GB/T1933—2009《木材密度测定方法》,从每块试件上截取尺寸均为  $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 20\text{mm}$  的立方体,经电光分析天平称重后逐一求得。

### 1.2 测试方法、试件和仪器

依据瞬态激励频率法<sup>[4,5]</sup>,用橡皮锤敲击 SPF 规格材试件使其产生横向自由振动,采集数据作快速傅里叶变换得其频谱,从频谱图中识别一阶弯曲固有频率  $f_1$ 。SPF 规格材试件和测试系统框图见图 1。

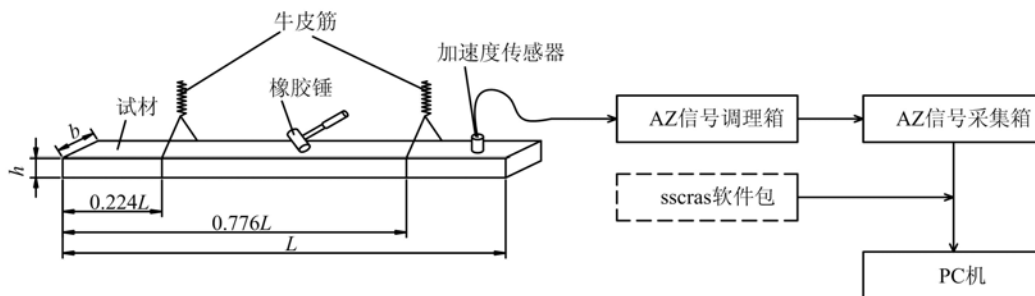


图 1 SPF 试件的基频测试系统框图

Fig. 1 Testing system flow chart of natural frequency of SPF testing lumbers

本文试验采用加拿大 SPF 规格材成品件试件共 12 块,其材面的标识级别为 II 级,规格为  $3670\text{mm} (D) \times 138\text{mm} (b) \times 37\text{mm} (h)$ 、气干密度  $\rho = 390 \sim 492 \text{kg}/\text{m}^3$ 、含水率  $MC = 6\% \sim 8\%$ 。

本文试验使用的仪器和量具如下:南京安正 CRAS 振动及动态信号采集分析系统 1 套,包括调理箱、采集箱、软件 SSCRAS 及计算机;CA-YD-126 型压电式加速度传感器 1 只,其电荷灵敏度为  $0.34 \text{pc}/\text{m}/\text{s}^2$ 、质量  $4\text{g}$ ;橡胶锤 1 把;带力传感器的力锤 1 把;TG328B 型电光分析天平 ( $0.001\text{g}$ ) 1 台;广卓 701 型外径千分尺 ( $0 \sim 25\text{mm}$ ) 1 把、Kanghong 牌钢卷尺 ( $0 \sim 5\text{m}$ ) 1 把和 HK-30 型 Wood Moisture tester 1 只等。

### 1.3 模态试验

从自由梁一阶弯曲固有频率推算弹性模量的精度关键在于如何实现试件的自由悬挂,真正的自由梁是不存在的,为验证测频中试件是自由悬挂的以及如何从频谱图中识别一阶弯曲固有频率,对试件作模态试验<sup>[6]</sup>,模态试验框图见图 2。采用安正 CRAS 振动及动态信号采集分析系统,其中的软件是 Macras 机械及结构模态分析。模态试验参数设置为:分析频率  $500\text{Hz}$ ,FFT 块大小为 1024,校正因子 CH1(力锤通道)为  $328 \text{pc}/\text{N}$ ,CH2(加速度传感器通道)为  $492 \text{pc}/\text{m}/\text{s}^2$ ,负触发方式(触发电平  $10\%$ 、触发延迟  $-20$ ),电压范围:  $\pm 5000\text{mV}$ (程控放大 1 倍),滤波频率  $500\text{Hz}$ 。

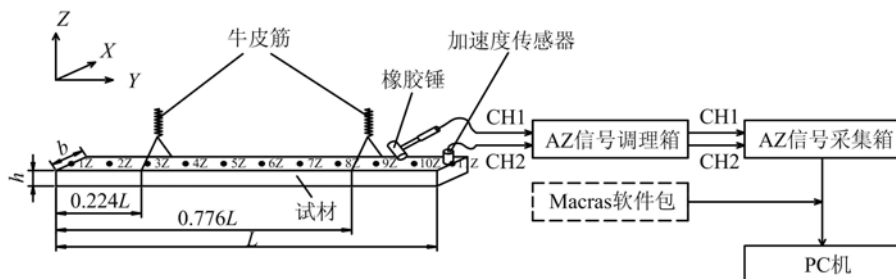


图 2 SPF 试材的模态试验测试系统框图

Fig. 2 Testing system flow chart of EMA of SPF testing lumbers

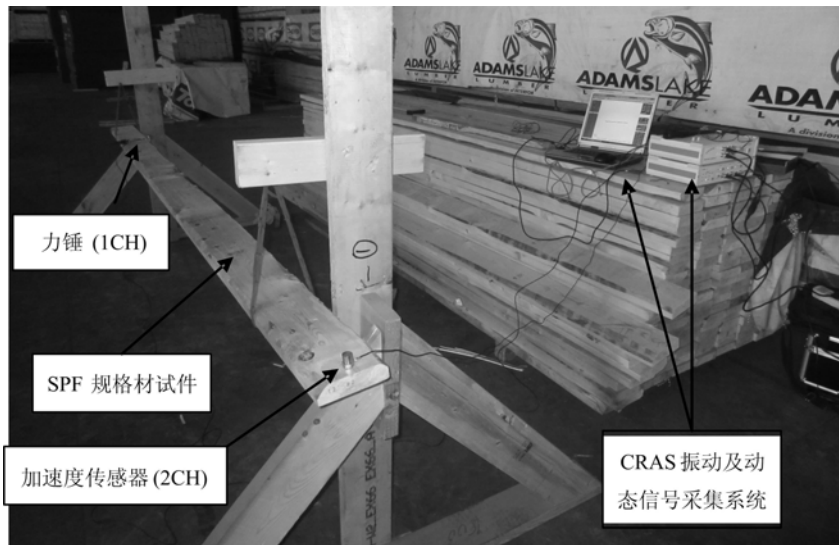


图 3 模态试验测试现场(南京北美木屋制造有限公司)

Fig. 3 Testing scene(Nanjing cogent home manufactory Ltd.)

本批试件沿长度方向 10 等分,采用 SISO 的固定响应点、移动敲击点的试验方法测量。

从实测的一阶弯曲振型参数,分别得到距试件左端 0.226L 处是一个节点;而距试件右端 0.236L 处是另一个节点。根据试件模态实测的二阶弯曲频率、三阶弯曲频率、四阶弯曲频率与一阶弯曲频率之比分别为 2.81、5.55 和 9.15。而理论上它们的频率之比分别为 2.76、5.40 和 8.93。实测 SPF 规格材试件后,根据模态试验所得到的二阶弯曲频率、三阶弯曲频率和四阶弯曲频率与一阶弯曲频率之比,十分接近。并且,模态试验还显示试件的一阶弯曲频率是在 13Hz~14Hz 区间内。从图 4 曲线中还发现在 2Hz 左右出现小高峰,若降低分析频率范围,可识别出是对应着刚体的平动与转动模态。

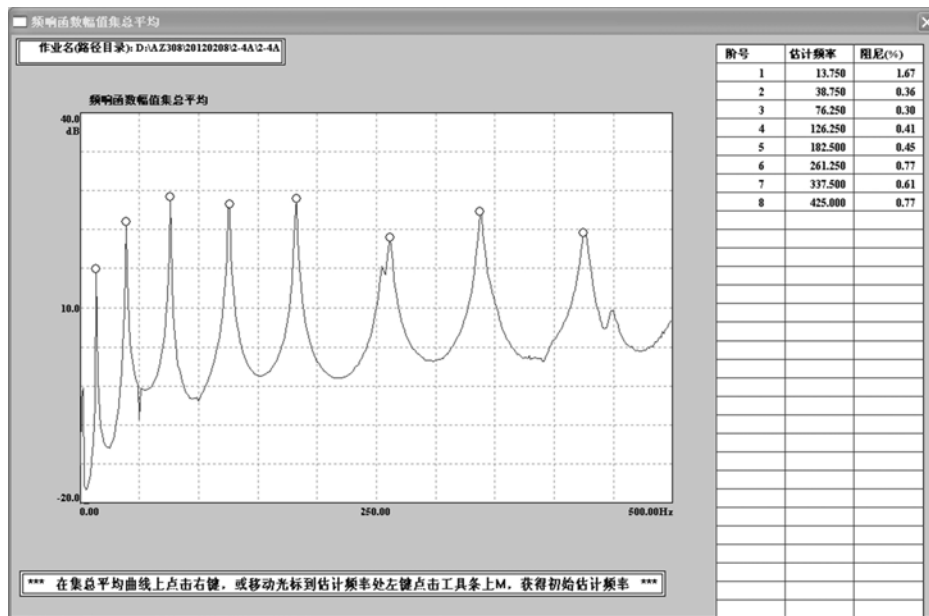


图 4 频响函数集的总平均曲线

Fig. 4 General average curve of its frequency response function

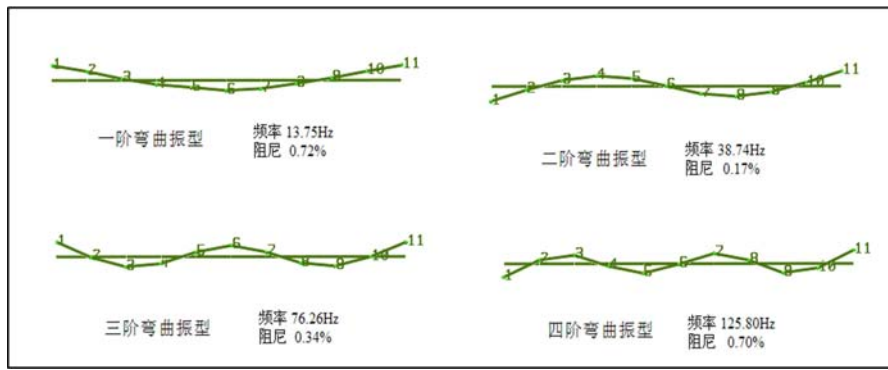


图 5 实测的 4 号试件前四阶模态振型、频率和阻尼

Fig. 5 Measured frontal four ranks bend mode, frequency and dampof No. 4 testing piece

## 2 瞬态激励频率法测试方案

上述模态试验的目的在于如何应用瞬态激励频率法高精度地测试 SPF 规格材弹性模量，通过模态试验结果的分析，提供瞬态激励频率法方案如下：

(1) 用牛皮筋悬挂 SPF 规格材成品试件，模态试验结果表明试验中采用的牛皮筋悬挂刚度可忽略，将试件处理为自由梁具有足够的精度。在试验时将试验用的牛皮筋挂于距试件左、右端 0.224L 处，以实现自由梁支撑。

(2) 瞬态敲击法单通道测试试件的一阶弯曲频率。在采集的参数设置上，分析频率设为 50Hz，FFT 长度为 2048(频率测试精度可达 0.0625Hz)，数据块 1 块，电压范围±5000mV，调理仪放大倍率设为 100。滤波频率设为 50Hz，防止频率混迭，以保证在频谱上不会出现三阶固有频率的混迭频率(假频率)。

(3) 加速度计安装于试件左端或右端，橡胶锤敲击试件跨中。跨中是二阶弯曲振型节点位置，使得在 50Hz 分析频率的频谱图上不出现二阶频率的峰值。

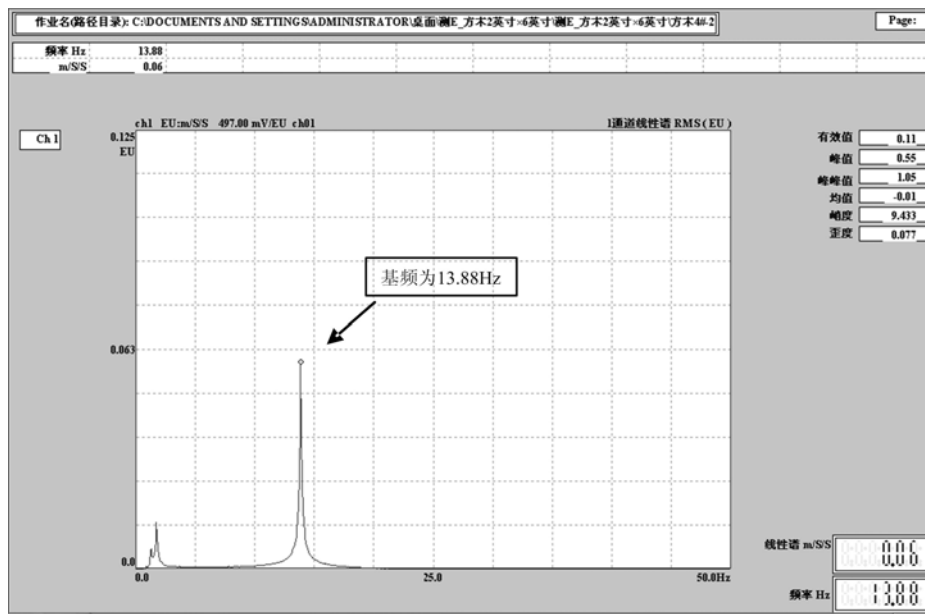


图 6 SPF 规格材的 4 号试件测量频谱

Fig. 6 Measured spectrum of No. 4 piece of SPF dimension lumbers

(4) 正式采集前，进入示波方式，连续敲击试件，以检查仪器连接线是否接通，波形是否合理等，不合理时将重新进行参数设置。以自由运行方式采集振动信号，并对其作频谱分析，由线性谱图第 1 个峰值读出基频值，如图 6 所示。图 6 中的横坐标表示频率(Hz)，纵坐标为振幅(EU)。对每块试件测量

2次,以验证试验数据的重复性和可靠性,每次采集1块数据。取其频率平均值作为推算弹性模量的频率。

图6为表2中SPF规格材4号成品试件的测量频谱,不难从频谱图上读出一阶弯曲频率,即基频频率为13.88Hz。图6上还可看到在2Hz附近出现了两个小高峰,它们分别对应的是试件刚体平动和转动模态。

### 3 测试结果及分析

#### 3.1 瞬态激励频率法测试结果

根据试件参数及其测量频率,得到表1。根据基频及式(2)计算的弹性模量,如表2所示。

表1 SPF试件的基本参数和测量值表(瞬态激励频率法)

Tab.1 Essential parameters and magnitude table of SPF test-pieces(Transient inspirit method)

试件编号	基频(Hz)	气干密度(kg/m <sup>3</sup> )	含水率(%)	试件编号	基频(Hz)	气干密度(kg/m <sup>3</sup> )	含水率(%)
1	15.50	462	8	7	15.13	440	7
2	16.25	492	7	8	15.38	450	8
3	16.00	486	6	9	15.06	434	7
4	13.88	390	8	10	15.63	459	7
5	15.13	441	7	11	14.44	418	8
6	15.81	478	6	12	15.11	436	7

表2 SPF试件的弹性模量值表(瞬态激励频率法)

Tab.2 MOE values of SPF test-pieces(Transient inspirit method)

试件编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MOE(MPa)	13917.3	16290.0	15600.0	9420.9	12658.0	14981.0	12629.3	13346.7	12342.1	14059.8	10928.5	11435.6

#### 3.2 瞬态激励频率法测试结果验证

为说明测试的正确性,需用其它方法加以验证,例如静态法或依据杆件纵向振动理论的应力波法。考虑到试件尺寸有3.67m,不宜在拉伸机上静态测量试材的弹性模量,故本文采用应力波法<sup>[7]</sup>对4号与5号试件进行检测。检测仪器为新西兰产HM200原木品质测量仪。每根试件重复测量三次,取其平均值作为波速 $v$ ,弹性模量 $E$ 的推算公式为 $E=\rho v^2$ ,应力波法测试结果如表3所示。

表3 4号、5号SPF试件的基本参数和测量值表(应力波法验证)

Tab.3 Essential parameters and magnitude table of No.4 and No.5 SPF dimension lumberts(stress wave method)

试件编号	应力波速度(km/s)	气干密度(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量(MPa)	含水率(%)
4	4.93	390	9491.73(9420.9)*	8
5	5.34	441	12591.08(12658.0)	7

\*:括号内数据是瞬态激励频率法测试的结果。

#### 3.3 结果分析

(1) 前四阶模态试验的结果与理论的自由梁振型节点位置和自由梁固有频率比值极为接近,说明

了试验用的牛皮筋刚度及悬挂点实现了自由梁的自由边界条件。

(2) 瞬态激励频率法测量一阶固有频率重复性好。在测频率时,由于参数设置为分析频率 50Hz, FFT 长度 2048,故频率分辨率为 0.0625Hz,该分辨率只占一阶固有频率测量值(均值)的 0.4%。因此,本文测出的一阶固有频率不但重复性好,还具有足够高的精度。因此,从频率推算出的弹性模量是可靠的;

(3) 对 4 号和 5 号试件,3.2 还用以纵向振动为理论依据的应力波法进行了测量,见表 2、表 3。对 4 号和 5 号试件,瞬态激励频率法测出的弹性模量与应力波法测出的弹性模量仅相差 0.7%。

(4) SPF 规格材的质量评估

GB50005—2003《木结构设计规范》中,目测分级进口 SPF 规格材的 II c 级弹性模量设计值为 9700MPa。显然,本批中仅 4 号成品试件实测的弹性模量值低于 II c 级规定的设计要求。

若将 12 个试件作为总体中的一个样本,可以用样本数据从概率角度分析总体规格材达 II c 级弹性模量设计值的概率。

根据表 2 弹性模量测量值可以计算出它们的平均值  $\bar{E}$ 、标准离差  $S$  和变异系数  $C_v$  为:

$$\bar{E} = 13289\text{MPa}, \quad S = 2012\text{MPa}, \quad C_v = 0.151.$$

假设子样测试弹性模量服从正态分布,由  $\bar{E}=13289\text{MPa}$ ,  $S=2012\text{MPa}$  及 II c 级弹性模量最低设计值 9700MPa,根据 Excel 常用函数 NORMDIST 返回正态分布函数值的计算,可推算总体规格材弹性模小于 9700MPa 的概率为 3.7%。

## 4 结论

(1) 本文用牛皮筋悬挂装置和试验方案实现了自由梁的自由支承边界条件,一阶固有频率的测量可靠且具有足够高的精度;

(2) 瞬态激励频率法测量规格材的弹性模量具有简便、快速、重复性好和精度高的优点;

(3) 根据加拿大进口的 12 根 SPF 规格材成品试件测量的试验结果,从概率分析可推断总体规格材达 IIc 材的合格率为 96.3%;

(4) 本文给出的瞬态激励频率法可在 SPF 规格材等材质刚度指标性能的检验、质量评级工作中发挥可靠的作用,对轻型木结构建筑等行业的检测技术工作有较高应用价值与现实意义。

## 参考文献:

- [1] 提摩盛科. 机械振动学[M]. 北京:机械工业出版社,1965:316—333(ChengKe Timothy. Mechanical Vibrational Science[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1965:316—333(in Chinese))
- [2] 张令弥. 振动测试与动力分析[M]. 北京:航空工业出版社,1992:123—230(Zhang Lingmi. Vibration Measurement and Dynamic Analysis[M]. Beijing: Aircraft Industry Press,1992:123—230(in Chinese))
- [3] GB50005—2003. 木结构设计规范[S], 2004:106—110 (GB50005—2003. Code for design of timber structures [S], 2004:106—110(in Chinese))
- [4] Zheng Wang, Ling Li, Meng Gong. Dynamic Modulus of Elasticity and Damping Ratio of Wood-based Composites using a Cantileverbeam Vibration Technique[J]. Construction & Building Materials, 2012,28(1):831—834.
- [5] Ilic J. Dynamic MOE of 55 species using small wood beams[J]. Holz Roh Werkst, 2003, 61(3):167—172.
- [6] 傅志方. 振动模态分析与参数辨识[M]. 北京:机械工业出版社,2002:2—56(Fu Zhifang. Modal Analysis of Vibration and Parameter Identification[M]. Beijing: Chinese Machine Press, 2002:2—56(in Chinese))
- [7] Wang X P, Carter P, Ross R J, et al. Acoustic assessment of wood quality of raw forest materials—A path to increase profitability[J]. Forest Products Journal, 2007, 57(5):6—14.

## Modulus of Elasticity Testing of Dimensioned SPF Lumber and its Evaluation Based on Frequency Method

WANG Zheng<sup>1</sup>, WANG Zhi-heng<sup>1</sup>, RAO Xin<sup>2</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>, YANG Yan<sup>1</sup>

(1. College of Wood Science & Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Polytechnic College of Agriculture and Forestry, Zhenjiang 212400, Jiangsu, China)

**Abstract:** With the help of modal experiment, the free support of specimen mounted on experimental apparatus proposed in this paper was verified firstly. Then, the first order natural frequency of specimen was measured by transient excitation and the modulus of elasticity of dimensioned SPF lumber was calculated. According to GB50005-2003 “Code for design of timber structures”, the probability of modulus of elasticity of this batch of SPF dimensioned lumbars reaching II c level is 96.3%. The transient excitation frequency method is rapid, simple and reproducible and has high accuracy. So, it is applicable for testing in industry of light wood frame construction.

**Keywords:** spruce-pine-fir(SPF); modulus of elasticity; frequency; modality; rating