

轻型木楼盖用平行弦木桁架的荷载试验研究

薛 硕, 张占宜, 周海宾

(中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 在 1.9 kPa 均布活荷载下, 对两种腹杆体系的平行弦木桁架进行荷载试验, 测试木桁架搁栅受力以及变形情况。结果表明: 相同荷载情况下, 两种平行弦桁架跨中以及端部的变形相近。利用有限元模拟计算出两种平行弦木桁架跨中挠度分别为 4.37、4.17 mm, 与试验结果相符, 远低于楼板挠度限定值 $L/360$ (L 为桁架跨度)。证明利用有限元模拟方法可以准确预测平行弦木桁架在应用中的受力以及变形情况, 为木桁架搁栅楼板的安全性设计提供技术支持。

关键词: 平行弦木桁架; 挠度; 承载性能; 有限元模拟

中图分类号: S781.2; TU323.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654 (2019) 06-0001-05

Load Bearing Test of Parallel Chord Truss of Light Wooden Covering

XUE Shuo, ZHANG Zhan-yi, ZHOU Hai-bin

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: A load bearing test on parallel chord wooden trusses with two web member systems under 1.9 kPa of uniform live load were conducted to evaluate the stresses and deformation of the light wooden truss joists. The results showed that under the same load, the deformations of the midspan and the ends of the two trusses were almost the same. The deflection of the trusses at midspan calculated by finite element simulation was 4.37 mm and 4.17 mm, respectively, which were consistent with the experimental results. The finite element simulation method proved to accurately predict stresses and deformation of parallel chord wooden trusses. This method could be applied in safety design for wooden truss joist.

Key words: parallel-chord wooden trusses; deflection; load-carrying properties; finite element simulation

随着木结构建筑推广应用, 越来越多的木桁架产品出现在木结构建筑中, 在北美地区超过 90% 的建筑采用轻型木桁架屋面或楼盖体系^[1]。平行弦木桁架是轻型木桁架楼盖体系中重要的搁栅构件, 其承载能力关系着整个楼盖结构的安全性能。作为一种结构设计性最高的楼盖搁栅构件, 平行弦木桁架可

通过上下弦、腹杆材料以及其组合的结构变换, 设计出刚度性能不同的系列产品^[2]。齿板连接平行弦木桁架以木材为主要材料, 是一种上下弦平行、弦杆与腹杆之间采用齿板连接的平面结构。

近年来, 伴随着建筑居住质量要求的提升, 对楼板的舒适度亦提出要求, 许多设计标准将楼板挠度控制列入其中。1964 年, 美国联邦住房局 (FHA) 规定木楼盖中单个搁栅或梁在均布设计荷载 (UDL) 下的挠度限定值应为 $L/360$ (L 为楼盖跨度)^[3]。由于足尺轻型木桁架的试验成本较高, 对其力学性能的研究报道较少^[4-5], 对于此标准下楼板搁栅足尺轻型木桁架的承载性能研究亦鲜见^[6-9]。

收稿日期: 2018-10-23; 修改日期: 2019-10-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“木桁架搁栅组合楼板的动力学振动机制研究”(31770603)。

作者简介: 薛硕 (1994—), 男, 硕士研究生。Email: 1040260800@qq.com。

责任作者: 周海宾, 男, 副研究员。Email: zhoubh@caf.ac.cn。

鉴于此,笔者依据加拿大1985年发布的National Building Code of Canada 中,对1.9 kPa 均布荷载下楼板挠度为 $L/360$ 的限定要求^[9],设计预制了两种平行弦木桁架(人字式腹杆体系和单斜式腹杆体系),并进行试验验证。通过有限元软件,模拟得到木桁架各杆件的受力及变形情况,并将试验结果与模拟计算结果进行对比,以期为楼板用平行弦木桁架的安全性设计,提供技术支持。

1 材料和方法

1.1 试验材料

1) 试材:加拿大规格材(SPF),等级为J级,截面尺寸为38 mm×89 mm,含水率约12%,用于制备两种轻型木桁架的腹杆以及弦杆。

2) 齿板:厚度1 mm,长度10.45 mm,宽度3.45 mm,齿密度为106~108 No/dm²,齿板主轴方向为冲孔的长轴方向。外购。

1.2 主要设备及仪器

TDS-530 动静态应变采集仪系统以及加载横梁一套,为了防止木桁架在试验过程中发生侧扭屈曲,在桁架1/3点处设置侧向支撑2套,通过地锚锚固;CDP-50 位移传感器3个,置于桁架两边支座以及跨中竖直方向。

1.3 试件制备

根据腹杆的摆放方式,设计了两种腹杆体系的木桁架:人字式木桁架和单斜式木桁架(图1),各制作三榀,编号分别为A1、A2、A3; B1、B2、B3。

两种桁架长度均为6 038 mm(上下弦为4 500 mm与1 538 mm的指接接长杆件),厚度89 mm,高度438 mm,每个节点间距为500 mm。

按照桁架构造设计及各个杆件的尺寸组装完成桁架,在桁架两端及跨中的垂直方向各放置1个位移传感器(P1、P2、P3),如图1所示。

1.4 加载方案

根据1.9 kPa作用下楼板的挠度应小于 $L/360$ 的要求^[9],对平行弦木桁架进行静力承载试验。试验采用的平行弦木桁架设计,是在楼板搁栅间距为600 mm的基础上进行荷载值定义,将楼板面荷载折算为桁架所受的线荷载,即楼板承受的强度为1.9 kPa时,桁架所受线荷载为:1.9 kPa×0.6 m=1.14 kN/m。

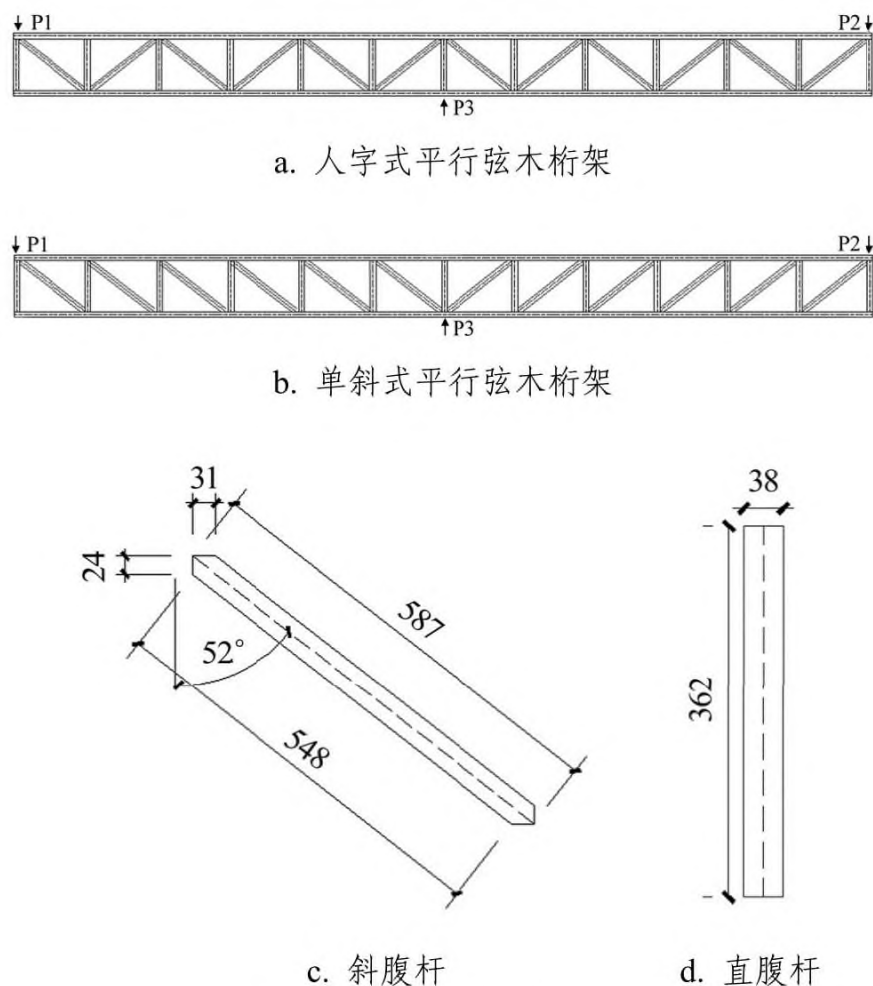


图1 木桁架主要杆件及构成

Fig.1 Composition of wooden trusses

按照材料力学理论^[10],计算出受均布荷载时桁架跨中最大挠度;同时进行试验验证,采用液压同步加载方式,在轻型木桁架的三分点处同步加载,跨间等间距集中荷载下桁架的最大挠度按式1计算。

$$Y_{\max} = 6.81 pl^3 / (384 EI) \quad (1)$$

式中: $Y_{\max}$ —木桁架跨中最大挠度,mm; p —各个集中荷载标准值之和,kN; E —材料弹性模量,N/mm²; I —截面惯矩,mm⁴。

将相同挠度下木桁架受均布荷载转化三分点处施加压力的荷载,通过式1得出:对木桁架加载的荷载应为2.51 kN。

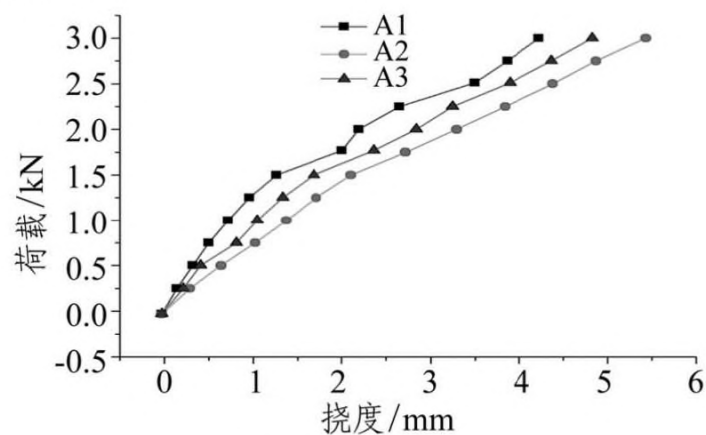
采用液压同步加载方式,在轻型木桁架的三分点处同步加载,参考JGJ/T 265-2012《轻型木桁架技术规范》及ASTM E 73-83“Standard Practice for Static Load Testing of Truss Assemblies”进行加载,以0.25 kN为一级,每级加载的时间间隔为1 min,最终加载到3 kN,待位移计读数稳定后记录数据。

2 结果与分析

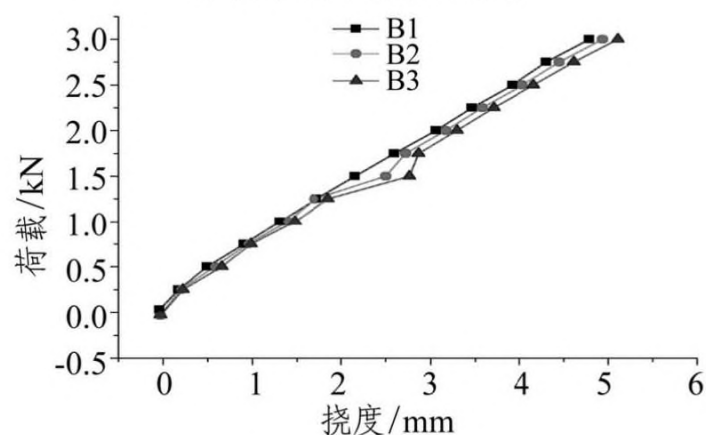
在加载过程中,两种木桁架试样均没有明显变形,待数据记录完毕卸载后,有0.1~0.3 mm之间的轻微残余变形,并无肉眼可见破坏。

2.1 静力加载

两种平行弦木桁架的荷载-挠度曲线如图2所示,挠度值取桁架跨中节点位移与两端部节点位移的均值差。



a. 人字式平行弦木桁架



b. 单斜式平行弦木桁架

图2 两种平行弦木桁架荷载-挠度曲线

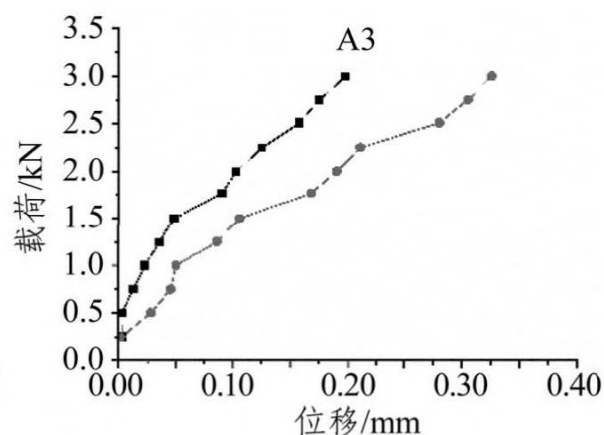
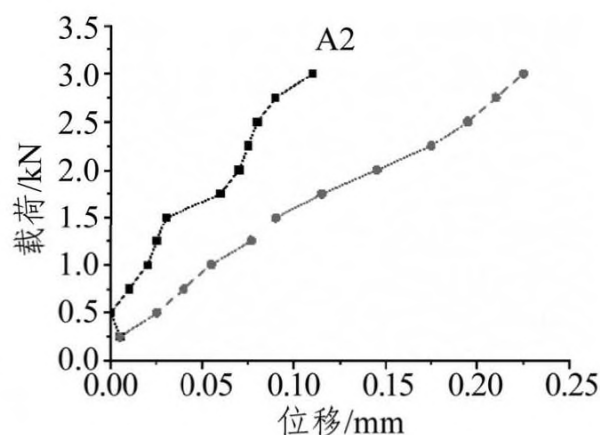
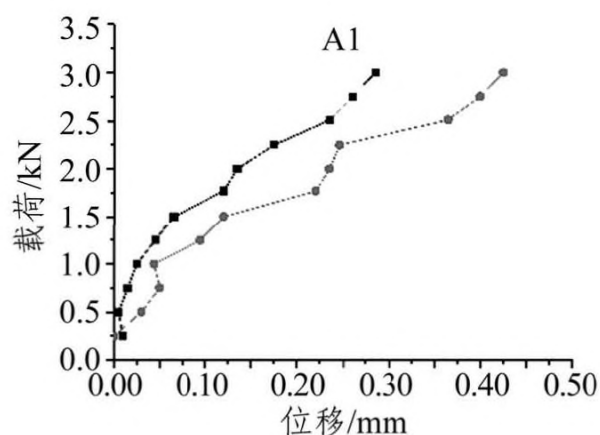
Fig.2 Load-deflection curves of two light wooden trusses

从图2曲线可以看出,随着荷载增大,两种木桁架的挠度基本呈线性增大,主要原因是木桁架处于弹性变形阶段,理论上桁架所受荷载为对称施加,其两端位移变化应相同。从图2中可以发现,桁架A1、A2的位移随荷载变化表现出较大差异,主要原因桁架的杆件全部为木材,而木材是一种非均质的生物质材料,还可能存在结疤等常见自然缺陷,而且桁架的上下弦为指接材,所以在试件承受压力增大时,桁架两端的位移存在一定的差异。施加荷载达到设计荷载时,人字式桁架的挠度分别为3.5、3.9、4.4 mm,单斜式桁架的挠度分别为3.9、4.0、4.2 mm,均满足设计要求(远低于 $L/360$)。

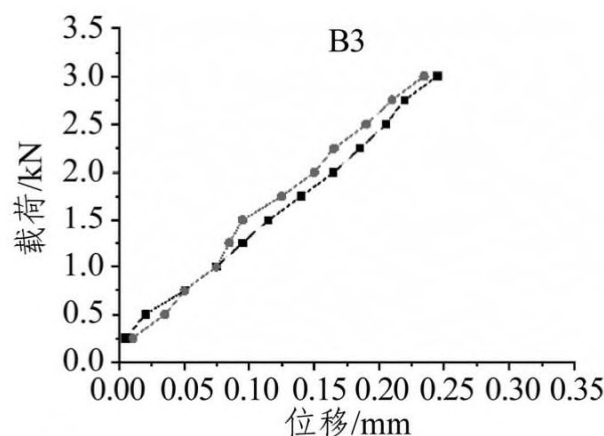
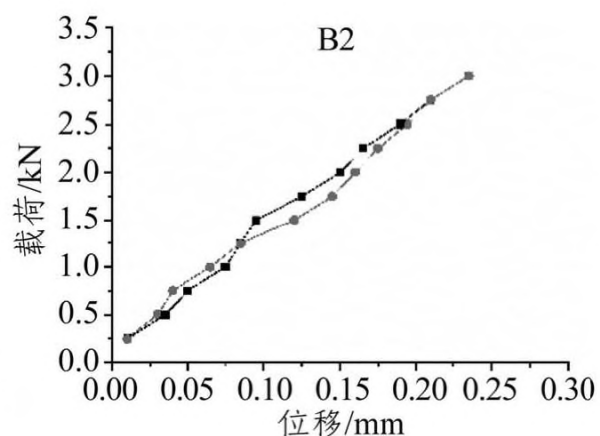
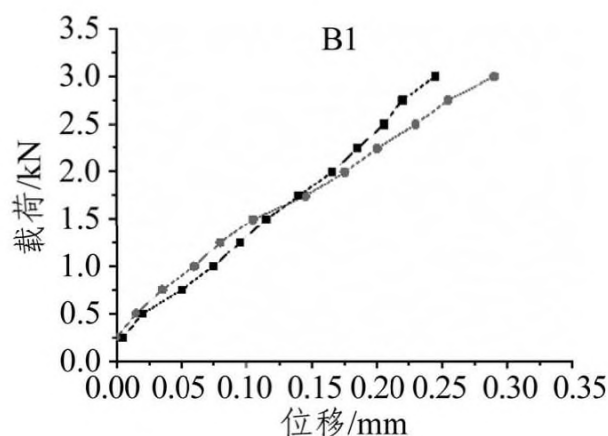
2.2 端点位移

图3为两种平行弦木桁架两端部节点的荷载-位移曲线。

由图3可以发现,桁架端部节点位移随荷载的增大而基本呈现逐渐增大趋势,且试样端部位移值之间存在较大差异。主要原因是平行弦木桁架两端位移测量处为腹杆以及弦杆三个杆件连接处,受力比较复杂。当节点受力时,三个杆件之间会发生一定程度的滑移。



a. 人字式木桁架端部节点



b. 单斜式木桁架端部节点

图3 两种木桁架端部节点荷载-位移曲线

Fig.3 Load-displacement curves at ends of two light wooden trusses

2.3 有限元模拟

2.3.1 模型建立

两种平行弦木桁架的计算模型，以木桁架各个杆件的中线为基准线，桁架一端采用固定铰支座，另一端采用滑动铰支座。模型见图4a。

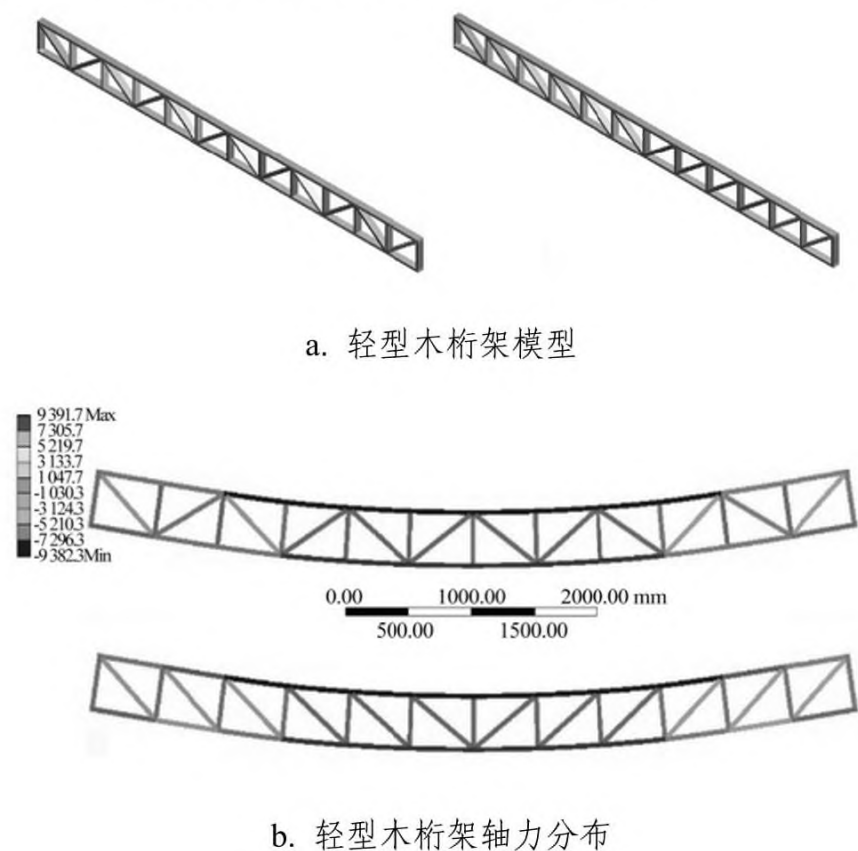


图4 轻型木桁架模拟结果分析

Fig.4 Simulation analysis of light wooden trusses

根据材料性质，木桁架各组成杆件在顺纹方向的弹性模量为12 GPa，两种木桁架杆件的截面尺寸为38 mm×89 mm，对桁架三分点处施加2.51 kN的集中荷载。桁架的腹杆为二力杆，模型建设中释放杆件的全部弯矩。由于试验采用静力加载模式，故模拟中只考虑恒荷载。轻型木桁架的有限元模型及轴力分布如图4b所示。

2.3.2 结果分析

通过模拟两种腹杆体系平行弦木桁架在设定荷载下的工作状态，得到桁架端点和跨中的位移，与桁架在静力承载试验中的结果对比列于表1。

由表1可知，人字式、单斜式木桁架跨中的位移有限元模拟结果分别为4.373、4.173 mm，与试验结果非常接近；跨中的位移最大，端部点的位移最小；两种木桁架端点处的模拟结果一致，均为0.027 mm，相比而言，试验结果均明显偏大。主要原因是模拟过程中将弦杆与腹杆连接处默认为铰接，而实际制造中，弦杆与腹杆之间为齿板连接，当桁架受力逐渐增大时，齿板的边缘齿容易倾斜导致节点的

表1 轻型木桁架各测试点模拟值与试验值对比

Tab.1 Comparison of simulation values and test values of wooden truss test points

桁架编号	位移/mm		
	P1点(端)	P2点(端)	P3点(跨中)
A(模拟)	0.027	0.027	4.373
A1	0.235	0.365	3.495
A2	0.08	0.195	4.383
A3	0.158	0.280	3.939
B(模拟)	0.027	0.027	4.173
B1	0.205	0.230	3.923
B2	0.190	0.195	4.158
B3	0.205	0.190	4.033

刚度呈降低趋势，所以桁架端部节点处的位移值大于试验模拟的结果。而桁架跨中节点受力与齿板主轴方向平行，当荷载较小时，不受连接方式的影响，所以试验结果和模拟结果基本一致。

3 结论

1) 按照楼板荷载1.9 kPa、桁架挠度低于 $L/360$ 的标准条件测试，人字式平行弦木桁架与单斜式平行弦木桁架的端部节点以及桁架挠度变化相差不大，证明在桁架腹杆数相同的条件下，两种平行弦木桁架的承载性能相同，在楼板搁栅的实际建造中可以灵活使用。如当腹杆挡住房屋管线时，可以改变桁架的腹杆体系；对裸露结构的桁架，通过变换桁架腹杆体系的结构形式，可增加楼板的设计美感。

2) 在试验荷载相同条件下，采用有限元软件，模拟获得木桁架的受力情况与实际试验结果一致。表明该模型可以有效预测轻型木桁架在实际应用中的受力以及变形情况。

参考文献：

[1] 周海宾. 木结构墙体隔声和楼板减振设计方法研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
[2] Cramer S M, Peyrot A H, Mtenga P V, et al. System factors for light-frame wood truss assemblies [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(2): 290-300.
[3] Federal Housing Administration (FHA). Minimum property standards for one and two living units[C]// FHA No.300.Washington, DC: FHA, 1964.
[4] 许晓梁, 马人乐, 何敏娟. 轻型木桁架静力试验及承载能力分析[J]. 特种结构, 2006, 23(1): 1-4.
XU X L, MA R L, HE M J. Analysis of light wood truss test and bearing

- capality [J]. Special Structures, 2006, 23(1): 1-4.
- [5] 王滋, 周贤武, 武国芳, 等. 国产落叶松平行弦轻型木桁架静力承载性能[J]. 林业科学, 2018, 54(2): 137-144.
- WANG Z, ZHOU X W, WU G F, et al. Load-carrying capacity of *Larix kaempferi* light wood trusses[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(2): 137-144.
- [6] Onysko D M. Performance and acceptability of wood floors-Forintek studies[C]// Proceedings of the symposium/Workshop on Serviceability of Buildings. Canada, University of Ottawa, 1988(1): 477-494.
- [7] 周海滨, 胡林涓, 费本华, 等. 工程木桁架搁栅楼板振动性能评价

- [C]// 全国生物质材料科学与技术学术研讨会, 2007.
- [8] LIU X Q. Three-dimensional modeling of metal plate connected wood truss joints [D]. Vancouver: University of British Columbia, Canada, 2013.
- [9] National Building Code of Canada. Commentary A: Serviceability criteria for deflections and vibrations [S]. Ottawa: National Research Council of Canada, 1985.
- [10] 张少实. 新编材料力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

(责任编辑 向琴)

《木材工业》杂志征稿简则

1 来稿要求

1.1 内容篇幅

与木材加工相关的行业评述、研究与开发、讨论与建议、应用技术等各栏目的文章均可投稿。要求论点明确, 突出研究的创新性和实用意义; 论据充分, 数据翔实; 条理清晰, 文字精炼; 4 000~5 000 字 (word 文档 4~5 页) 为宜。

1.2 书写顺序

中文题名→作者姓名 (不超过 5 人) →单位全称、所在城市、邮编→中文摘要 (200 字内)、关键词→英文题名→作者姓名拼音、单位英文名称→英文摘要、关键词→正文→参考文献 (15 篇以内)。

首页页脚标注: ① 基金项目来源+名称“编号”(如有); ② 第一作者的姓名 (出生年—), 性别, 职称, Email; 责任作者 (如有) 的姓名, 性别, 职称, Email。

1.3 标题层次

以阿拉伯数字连续编号, 如 1; 1.1; 1.1.1; 左起顶格, 序号后空一格写标题。

1.4 图表设计

应合理紧凑, 并附对应英文的图题、表题。每篇文章插图或表格以 6 幅内为宜, 表格以双栏宽为宜 (≤ 8.3 cm)。

插图黑白颜色、线型清晰;

表格采用三线式。空格示“未测”或无此项;

“—”表示无结果。

1.5 量与符号

使用国家现行的法定计量单位和符号, 请勿使用废弃单位及符号, 正确区分大小写、正斜体。

1.6 参考文献

按照 GB/T 7714-2015 《信息与文献参考文献著录规则》著录, 按其在正文中出现的先后进行排序, 以阿拉伯数字连续编号, 在引文处用“[]”以上标的形式标注。作者的“姓”用全拼、大写, “名”用缩写、首字母大写。尽量选用近十年的文献。

2 出版须知

2.1 版权申明

为避免版权纠纷和防止一稿两 (多) 投现象, 投稿时请务必申明: 本刊是该文稿唯一的投寄刊物。审稿期间未收到本刊不予录用的书面通知前, 请勿再 (改) 投其他刊物。

2.2 发表流程

文稿需通过初审、专审等程序, 方可进入编辑流程。初审通过的稿件, 需遵照《中华人民共和国著作权法》, 与本刊签署文章出版协议后, 进入专审程序。自收稿之日起 3 个月内完成审查, 并通知作者刊用与否。

2.3 稿酬

为支持专业学术期刊的发展, 通过审查的文稿, 需根据版面数量、编辑加工量及发稿时间, 支付一定的出版费。

文稿刊登后, 一次性付给作者税后稿酬 (含电子版稿酬), 并赠送样刊若干。

投稿请登录本刊采编系统:

mcgy.criwi.org.cn

未尽事宜, 解释权归本刊编辑部

