

我国平行弦木桁架研究现状

赵子宇¹, 任海青², 袁哲¹, 荣春林³, 陈昱辰¹, 韩善宇¹, 强明礼¹

(1. 西南林业大学, 云南昆明 650224; 2. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 3. 云南创合木屋有限公司, 云南昆明 650220)

摘要: 木桁架承载性能优良、节约用材、经济性好、加工施工快捷, 是现代木结构的主要构件之一。以轻型平行弦木桁架为研究对象, 从结构材、节点与连接、承载性能、计算理论及技术规范等方面, 对我国平行弦木桁架的研究现状进行了分析梳理, 并对平行弦木桁架今后的研究趋势进行了展望。

关键词: 木结构; 平行弦木桁架; 现状及展望

中图分类号: S781; TU323.4; TU366.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2020) 01-0030-05

Current Status of Wooden Parallel-Chord Truss Research in China

ZHAO Zi-yu¹, REN Hai-qing², YUAN Zhe¹, RONG Chun-lin³, CHEN Yu-chen¹, HAN Shan-yu¹, QIANG Ming-li¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

3. Yunnan Chuanghe Wood House Co., Ltd, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: Wood truss is one of the main components of modern wood structure, which has excellent bearing capacity, material saving, good economics and fast processing and construction. Taking light parallel-chord wood truss as an example, the authors analyzed the current status of parallel-chord wood truss research in China from the aspects of structural materials, joints and connections, bearing capacity, calculation theory and technical specifications. Suggestions were also given on future research needs of parallel chord wood trusses in China.

Key words: timber structure; wooden parallel-chord truss; status and prospect

桁架是现代木结构建筑屋盖和楼盖的主要承重构件。根据外形, 木桁架可分为 4 类, 即平行弦木桁架、三角形木桁架、梯形木桁架和多边形木桁架。平行弦木桁架主要用于平屋盖和楼盖, 三角形木桁架和梯形木桁架多用于坡屋顶, 多边形木桁架多用于弧形屋顶。

与实木梁相比, 木桁架承载力相对较高、跨度大、节约用材、能够工业化预制。我国对轻型木桁架的研究和应用起步较晚, 自欧美现代木结构技术体系引进之后, 相关研究取得较大进展, 研究方向主要集中在结构材的选择与分等、荷载理论分析计算、节点连接、承载性能研究, 以及标准规范的制定等方面。

1 平行弦木桁架的构造及特点

在现代轻型木结构中, 平行弦木桁架以规格材为基材, 多采用齿板连接件装配而成, 如图 1 所示。主要组成部分包括上下弦杆、腹杆和连接件等。木

收稿日期: 2019-01-17; 修改日期: 2019-05-02

基金项目: 国家自然科学基金“滇西北多元文化交错区藏族风土建筑谱系研究”(51868070); 西南林业大学博士启动基金“腹杆间距对 SPF 平行弦木桁架承载性能的影响研究”(11195)。

作者简介: 赵子宇(1994—), 男, 硕士研究生。Email: 970616322@qq.com

责任作者: 强明礼, 副教授。Email: 30431702@qq.com

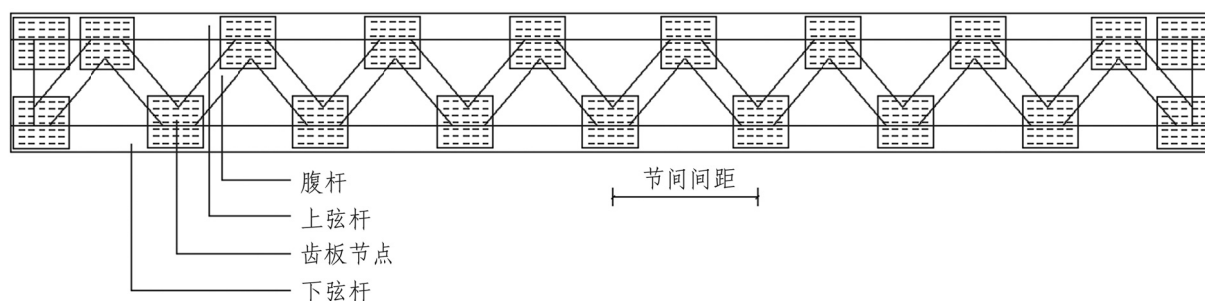


图1 平行弦木桁架

Fig.1 Wooden parallel-chord truss

桁架不仅能够传递竖向荷载，还能与楼面覆板、墙骨柱、墙面覆板共同作用，抵抗侧向荷载^[1]。

平行弦木桁架按照杆件摆放形式，分为杆件平置式木桁架和杆件立置式木桁架两种。前者的杆件横向放置，即规格材平置；后者的杆件竖向放置，即规格材侧立放置^[2]。

在平行弦木桁架中，桁架上下弦杆拼接数量较少，节点构造统一，共同形成承重梁架系统，能承受拉力、压力及弯矩。在破坏过程中，节点通常先于构件破坏，导致杆件互相脱离，从而造成桁架整体结构失效。

平行弦木桁架可近似简化为简支梁，在竖向荷载下各杆件主要承受拉力或压力。弦杆轴力由跨中向两端递减，腹杆轴力由跨中向两端递增，并作用于上下弦杆，之后由上下弦杆端部传递至墙体或柱子等竖向构件，并最终传至基础。平行弦木桁架的弦杆和腹杆在面内受力，并与垂直杆件共同组成空间稳定体系^[3]，因此能够充分发挥材料自身的作用，减轻结构自重。在实际应用中，通过改变腹杆位置可调节桁架承载力。

2 平行弦木桁架的研究现状分析

2.1 平行弦木桁架结构用材

平行弦木桁架用材研究，在木材选择方面主要集中在 SPF（冷杉-松-云杉）、杉木、落叶松（国产或日本）等树种。研究重点为结构用材的强度指标和强度分等。根据国内对测试方法的研究，基于三点弯测试验，建立密度和节子对 SPF 抗弯强度和弹性模量的影响规律^[4]，通过数学分析模型，分析了杉木抗弯强度和动态弹性模量的关系^[5]。

为了满足结构可靠度的要求，采用足尺试件测

试了落叶松规格材的抗压强度、抗弯强度、弹性模量、剪切强度等，为落叶松强度分等和结构应用提供了理论依据^[6]。对国产落叶松进行抗压强度的可靠性分析结果表明，随着抗压强度的增加和活荷载的降低，可靠性指标呈非线性下降趋势^[7]。

近年来，对结构材机械分等进行研究，基于应力波和静态弯曲方法，对比测试了 4 种北方阔叶材的抗弯弹性模量，结果表明，应力波模量与抗弯弹性模量的相关性最强^[8]。未来还需开展结构材承重蠕变性、强度与木材缺陷关系等研究，完善国产规格材力学性能测试与建模仿真，扩大结构材在平行弦木桁架中的利用。

目前我国平行弦木桁架用材仍以进口材为主，有待系统开展本土、人工林树种木材的强度设计与可靠性分析研究，为本土树种的应用提供理论支撑。

2.2 平行弦木桁架节点及连接

节点连接是影响平行弦木桁架承载力性能的重要因素。我国节点连接性能的研究刚刚起步。通过借鉴国外成果和研究经验，带动了国内金属连接件的发展，节点连接形式呈多样化发展。

从我国木结构的历史来看，木桁架的传统连接方式有钉连接（配合结合板）、自攻螺钉连接、齿板连接等。在现代轻型木结构中，平行弦木桁架的节点主要采用齿板连接。

齿板连接由钉连接与螺栓演变而来^[9]，主要用于轻型木桁架节点连接和杆件的接长。因节点受力大小不同，因而齿板尺寸规格也多样化，以满足节点承载力需求。

齿板的受压承载力较低，齿板连接件的作用主要是传递拉力。齿板连接的性能与木材纹理方向、荷载作用方向有关。齿板连接件的破坏形式，主要

有板齿与木材之间的分离、齿板屈服、齿板断裂等,其中板齿与木材分离和齿板受力断裂较为常见^[10]。

齿板连接节点在剪-拉组合作用下,齿板主轴与荷载之间的夹角变化,对节点承载力影响较大;在节点剪-压组合作用下,与剪-拉作用时承载力的情况一致^[11]。

齿板连接节点的承载性能受齿板齿长影响,齿长增加可提高节点极限承载力和节点刚度^[12]。齿板承载力试验中,板齿极限强度试验破坏形式常为齿拔出破坏;齿板剪切强度试验,破坏形式常为齿板与木材的接缝处开裂、齿板端部齿拔出,以及齿板在木材接缝处翘曲^[13]。

自攻螺钉由 Q235 低碳钢或 Q345 低合金高强度钢制成,可通过硬化螺纹和增大柄径的比率,提高其抗拔能力,从而提高节点承载力^[14-15]。自攻螺钉以往多用在钢结构节点中,近年来逐渐运用到了木桁架中,但对其连接性能的研究尚未达到齿板连接的广度和深度。目前有关自攻螺钉连接的研究,多以抗拔承载力和相关的影响因素(如螺杆锚固深度、倾斜角度、直径等)研究为主。

钉连接适用于多榀木桁架的组合钉接^[16],主要用于抵抗拔力和传递剪力。JGJ/T 265—2012《轻型木桁架技术规范》规定,在实际应用中,钉连接可与结合板配合使用,加强节点^[17],但有关这种节点连接的理论研究鲜见报道。

2.3 平行弦木桁架承载性能研究

平行弦木桁架进行静力加载试验时,破坏形式主要表现为节点处齿板拔出及杆件缺陷处破坏。杆件平置式平行弦木桁架的节点齿板与构件接触面小,因而节点强度较低,易出现多个节点同时起齿现象,导致节点破坏,具体表现为桁架在杆件未发生明显变形时即进入破坏阶段;杆件立置式平行弦木桁架的齿板与构件接触面积相对较大,因而节点强度相对较高,但杆件局部易发生断裂^[2, 18],破坏形式主要为杆件破坏。从“强节点,弱构件”的角度考虑,杆件立置较为合理。

1/3 缩尺的轻型木桁架与足尺轻型木桁架的承载性能对比试验发现,1/3 缩尺的轻型木桁架刚度的变异性较大,但是各项性能的均值与足尺试样相似,由此认为,轻型木桁架缩尺试验是可行的^[19]。

平行弦木桁架多用作楼面搁栅,按照一定间距排布。有研究认为,单榀木桁架具有较高的承载力,极限承载力超过设计荷载 3~4 倍,有较大的安全储备^[20],但稳定性较差,在无侧向支撑的情况下,易导致发生侧向失稳^[21]。多榀木桁架除受到上部均布荷载外,还受到其他搭接桁架传递的集中荷载,其受力工况更复杂,极限承载力同样远高于设计荷载。

笔者以平行弦木桁架几何构型为研究对象,经过材料和节点性能测试、结构分析与计算及足尺试验,探寻腹杆位置变化与桁架承载力之间的关系。结果表明,桁架的破坏形式主要为节点齿板拔出而导致的桁架失效,破坏位置主要出现在端部,与模型理论分析相一致。现有的平行弦木桁架研究偏于基础理论,导致木桁架设计理论研究的不连续、不完整。未来还需开展不同跨度、不同高度等多种工况的试验,为平行弦木桁架质量控制提供理论依据。

2.4 平行弦木桁架的计算方法与模型分析

2.4.1 平行弦木桁架的设计计算方法

我国工程结构计算,采用以概率理论为基础的极限状态设计法。在现代木结构中,平行弦木桁架以极限状态设计法进行设计计算,并以压杆稳定设计直接法进行验算^[22-23],以杆件截面为设计变量,以结构重量最小化为目标,进行桁架承载性能和变形计算^[24]。

平行弦木桁架的节点主要有两种形式:一是支座端节点,二是腹杆节点。在计算中,按结构形式和连接位置,建立计算模型,对构件内力与变形进行静力计算。静力分析时,荷载根据桁架间距、受荷面积均匀的分配至上、下弦杆;构件设计时,各杆件的轴力与弯矩满足以下 3 个条件:轴力取杆端轴力平均值,弦杆节间弯矩,取该节间最大弯矩,拉弯与压弯杆件,取跨中与两端弯矩的最大值。齿板节点上的力,取与该节点相连杆件的杆端内力^[17]。

2.4.2 平行弦木桁架的模型分析及常用软件

在平行弦木桁架理论分析中,SAP 2000 是常用的有限元分析软件,用于分析结构受力、节点连接、破坏形式等,为结构设计提供了方便的建模工具和设计工具。有研究采用 SAP 2000,对平行弦木桁架与平行弦钢桁架进行了比较分析,得到了两种桁架杆件轴力的分布规律:结构跨中位置的位移最大,

从跨中向两端支座处位移值逐级递减, 这为桁架试验提供理论支撑^[25]。

ObjectARX 软件是基于 AutoCAD 平台二次开发的软件包, 能快速访问 AutoCAD 图形数据库, 可对任意的桁架形式、节点连接形式进行建模计算。有学者采用节点模拟法, 对桁架节点连接进行优化分析, 通过软件对桁架弦杆、腹杆、节点进行建模, 从而得到桁架的内力分布, 可简化桁架的工程设计计算过程^[26]。

ANSYS 有限元分析软件用于节点连接分析, 能够确定结构应力、应变、变形及反作用力等。通过 ANSYS 有限元软件对齿板节点进行模拟, 可得到不同齿板的齿长、板厚、开孔率以及齿孔排列, 对平行弦木桁架节点受拉、受剪的影响, 为平行弦木桁架节点承载力设计提供依据。有学者对平行弦木桁架在外加荷载作用下应力和位移进行分析, 发现产生的应力和外部荷载引起变形的趋势^[27]。

SMsolver 结构力学求解器可用于计算几何结构、内力、振动、极限负荷、截面受力等数据, 多用于试验和工程项目分析。有研究表明, 应用 SMsolver 结构力学求解器建立的桁架平面模型, 计算结果与实际加载结果较为接近^[28]。笔者也曾使用该结构力学求解器, 进行平行弦木桁架的内力分析, 并进行了静力加载试验, 试验结果和软件分析基本一致。但该软件在材料设置方面, 缺少木材相关属性选择。

对平行弦木桁架承载力理论分析, 一般先应采用力学求解器对构件内力、位移进行初步分析, 然后利用有限元软件对节点与构件进行受力模拟, 为承载力试验提供有效的理论支撑。

2.5 平行弦木桁架的规范要求

经过数十年的研究探索, 平行弦木桁架在理论和应用实践方面得到了长足发展, 逐步制定并颁布了相关标准和规范。

1955—1988 年间, 我国颁布过三次木结构设计规范, 主要对木结构的材料选取与连接方法进行了初步规定。随着现代木结构在国内的迅猛发展, 建设部于 2003 年修订颁布了 GB 50005—2003《木结构设计规范》, 对轻型木桁架材料、计算、连接等做了专门规定。2018 年实施修订的 GB 50005—2017《木结构设计标准》, 进一步补充轻型木桁架的设计计算规定。

与木桁架设计与制造相关的规范和标准还有: JGJ/T 265—2012《轻型木桁架技术规范》、GB/T 50329—2012《木结构试验方法标准》等, 分别对结构材料、结构构件与连接设计、防护、制作与安装、维护管理、承载力测试等方面进行了规定。行业应用现状表明, 有些标准和规范仍需进一步修订完善, 如有关混合结构的规定^[29]、防护材料的规定^[30]、轻型木桁架杆件^[2]及连接件^[31]的规定等。

3 展望

综观文献及行业应用, 平行弦木桁架的深入研究亟需从以下几个方面开展:

1) 加强平行弦木桁架用材研究。目前平行弦木桁架主要以进口规格材, 如 SPF、美国花旗松、红松、日本落叶松等作为主要材料, 对国内本土树种研究较少。我国各地特色树种和速生用材树种, 如云南松、马尾松、云杉等, 亟需开展这些树种木材用于结构材的性能研究, 以支撑行业发展对资源的需要。

2) 结合木材的性能特点, 开展针对性的平行弦木桁架理论计算与分析研究, 以形成有效的方法和理论。并且, 在装配式建筑的发展趋势下, 建筑模数和功能, 与桁架形式、设计要求、材料选择、制造工艺、承载力、稳定性之间的关系, 需做系统性研究, 建立平行弦木桁架质量控制理论体系。

3) 与木桁架相关的标准和规范还需进一步修订和完善, 重点应集中在连接件连接、桁架形式、桁架构件、以及桁架承载力等方面。

参考文献:

- [1] 武国芳, 王滋, 王丽, 等. 轻型木桁架受力性能的有限元模拟[J]. 木材工业, 2017, 31(5): 5-8.
WU G F, WANG Z, WANG L, et al. Structural behavior evaluation of light wood trusses by finite element method analysis[J]. China Wood Industry, 2017, 31(5): 5-8.
- [2] 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.
- [3] 刘永健, 傅梅珍, 刘士林, 等. 现代木结构桥梁及其结构形式[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(1): 83-91.
LIU Y J, FU M Z, LIU S L, et al. Modern timber bridges and their structure types[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(1): 83-91.

- [4] 阙泽利, 李哲瑞, 冒海燕, 等. SPF 规格材密度与节子变异特性对抗弯性能的影响[J]. 林产工业, 2016(3): 16-18.
QUE Z L, LI Z R, MAO H Y, et al. The Influence of bending performance by the variations in wood density and knot of SPF dimension lumber[J]. China Forest Products Industry, 2016(3): 16-18.
- [5] 周海宾, 任海青, 吕建雄, 等. 结构用杉木规格材含水率与抗弯性能关系研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2): 232-235.
ZHOU H B, REN H Q, LV J X, et al. Relationship between moisture content and bending property of chinese fir structural lumber[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 15(2): 232-235.
- [6] 娄万里, 王朝晖, 骆秀琴, 等. 落叶松规格材足尺弯曲性质研究[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(2): 185-189.
LOU W L, WANG Z H, LUO X Q, et al. Full-size bending mechanical properties of Dahurian larch dimension lumber[J]. Journal of Agricultural University, 2012, 15(2): 232-235.
- [7] ZHONG Y, JIANG Z, REN H. Reliability analysis of compression strength of dimension lumber of northeast China larch[J]. Construction & Building Materials, 2015, 84: 12-18.
- [8] S J Smulski. Relationship of stress wave and static bending-determined properties of four northeastern hardwoods[J]. Wood Fiber Sci, 1991, 23(1): 44-57.
- [9] 费建波, 王鹏. 木结构连接的概述与分析[J]. 山西建筑, 2010, 36(19): 100-102.
FEI J B, WANG P. General discussion and analysis on the connection of wooden structures[J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(19): 100-102.
- [10] 蒋垠龙, 马人乐, 欧智星, 等. 螺栓压接齿板承载力性能试验研究[J]. 结构工程师, 2012, 28(5): 135-141.
JIANG Y L, MA R L, OU Z X, et al. Experimental study on load bearing capacity of metal plates with bolts [J]. Structural Engineers, 2012, 28(5): 135-141.
- [11] 罗欢, 吴晓莉, 王智恒. 木桁架齿板连接节点抗剪性能的研究[J]. 木工机床, 2014(2): 15-19.
LUO H, WU X L, WANG Z H. Experimental investigation on toothed metal-plate-connected joints in light wood constructions[J]. Wood-working Machinery, 2014(2): 15-19.
- [12] 叶虹, 谢宝元, 费本华. 国产木桁架齿板连接件的研发[J]. 林业科学, 2012, 48(1): 148-153.
YE H, XIE B Y, FEI B H. Research and development of domestic truss plate[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(1): 148-153.
- [13] 王滋, 赵荣军, 武国芳, 等. 日本落叶松规格材齿板节点承载性能[J]. 林业科学, 2017, 53(11): 157-163.
WANG Z, ZHAO R J, WU G F, et al. Bearing performance of truss plate joint with domestic larch[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(11): 157-163.
- [14] QUE Z L, Kohei Komatsu, CAI W Z. Experimental and numerical analyses on nonlinear behaviour of wooden parallel chord trusses composed of self-tapping screws[J]. Journal of Wood Science, 2018, 15(11): 570-581.
- [15] Tannert T, Lam F. Self-tapping screws as reinforcement for rounded dovetail connections[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2010, 16(3): 374-384.
- [16] 阙泽利, 高一帆, 戈禧芸. 多榫木桁架的研究现状与发展趋势[J]. 林业工程学报, 2017, 2(2): 138-144.
QUE Z L, GAO Y F, GE X Y. A review of the research of wood girder truss[J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(2): 138-144.
- [17] JGJ/T 265-2012, 轻型木桁架技术规范[S].
- [18] 陈秋韵, 滕启城, 高一帆, 等. 杆件摆放方式对平行弦木桁架承载力的影响[J]. 林产工业, 2017(6): 20-25.
CHEN Q Y, TENG Q C, GAO Y F, et al. Mechanical properties of parallel-chord wood truss components with different chord arrangements[J]. China Forest Products Industry, 2017(6): 20-25.
- [19] Gupta R, Miller T H, Kittel M R. Small-scale modeling of metal-plate-connected wood truss joints[J]. Journal of Testing & Evaluation, 2005, 33(3): 139-149.
- [20] 王志强, 王转转, 崔凡承, 等. 速生杉木平行弦木桁架承载力分析[J]. 建筑技术, 2017, 48(4): 424-426.
WANG Z Q, WANG Z Z, CUI F C, et al. Bearing capacity of parallel chord wood truss made of fast-growing Chinese fir[J]. Architecture Technology, 2017, 48(4): 424-426.
- [21] 王滋, 王丽, 张赛男, 等. 轻型木桁架的研究现状与发展趋势[J]. 林产工业, 2016, 43(2): 3-7.
WANG Z, WANG L, ZHANG S N, et al. The research status and the development trend for light-frame wood truss[J]. China Forest Products Industry, 2016, 43(2): 3-7.
- [22] 商怀帅. 桁架结构的可靠度分析与优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [23] 曾丹, 周先雁, 曹磊. 落叶松胶合木柱轴心受压性能研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(2): 63-67.
CENG D, ZHOU X Y, CAO L. Research on the mechanical properties of larch glulam column under axial compression[J]. Industrial Building, 2016, 46(2): 63-67.
- [24] 王永维. 概率极限状态设计方法及在木结构设计规范中的应用(二)[J]. 四川建筑科学研究, 1982(2): 40-46.
WANG Y W. Probability limit state design method and its application in the code for design of timber structures (2)[J]. Sichuan Building Science, 1982(2): 40-46.
- [25] 李昌荣, 朱勇. 空间胶合木桁架与钢桁架性能比较分析研究[J]. 华南地震, 2014, 34 增(1): 85-89.
Li M R, ZHU Y. Analytical research on the comparison between glulam space truss and steel space truss[C]. South China Journal of Seismology, 2014, 34, Supp(1): 85-89.
- [26] 杜明, 何敏娟. 基于 ObjectARX 的轻型木桁架节点模拟软件[J]. 计算机辅助工程, 2010, 19(4): 105-109.
DU M, HE M J. Node simulation software for light frame trusses based on ObjectARX[J]. Computer Aided Engineering, 2010, 19(4): 105-109.
- [27] Ergün Güntekin, İbrahim Halil Başboğa, Tuğba Yılmaz. Finite element analysis of parallel chord wood trusses[J]. Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi, 2012, 8(1): 102-106.
- [28] 蒋越, 吴丹, 肖辉, 等. 木桁架结构不同构造下承载能力研究[J]. 经贸实践, 2015(14): 317.
- [29] WU Y, XIAO Y. Steel and glulam hybrid space truss[J]. Engineering Structures, 2018, 171: 140-153.
- [30] 吕建国. 国内外木结构建筑发展研究[J]. 上海建材, 2012(2): 37-38.
LV J G. Research on the development of wood structure building at home and abroad[J]. Shanghai Building Materials, 2012(2): 37-38.
- [31] 李元齐, 潘斯勇. 自攻螺钉连接承载力研究现状[J]. 结构工程师, 2008, 24(6): 154-158.
LI Y Q, PAN S Y. Research progress on self-drilling screw connection capacity[J]. Structural Engineers, 2008, 24(6): 154-158.

(本文编校 向琴)