

# 树形木结构的形态与稳定性研究

郝剑楠<sup>1</sup> 程小武<sup>1,\*</sup> 陆伟东<sup>1</sup> 路奎<sup>2</sup> 张俊<sup>2</sup> 李强<sup>3</sup> 赵康兵<sup>4</sup>

(1. 南京工业大学土木工程学院, 南京 211800; 2. 南京市园林工程管理处, 南京 210008;  
3. 南京园林建设总公司, 南京 210008; 4. 南京园林经济开发有限责任公司, 南京 210008)

**摘要** 树形结构是一种新颖的结构形式, 在工程实践中得到了大量应用。通过分析国内外树形结构工程的结构特点, 总结了适用于木结构的树形结构特征。采用计算长度系数法对典型树形木结构的稳定性进行分析, 并给出了相应的分析结果和参数设计建议。通过对典型树形木结构工程——美国比弗顿图书馆进行结构分析, 得到各杆件计算长度系数均满足建议取值, 为今后树形木结构的设计提供参考依据。

**关键词** 木结构, 树形结构, 稳定性, 计算长度系数

DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2015.02.014

## Morphological and Stability Reserch for Tree-like Timber Structures

HAO Jiannan<sup>1</sup> CHENG Xiaowu<sup>1,\*</sup> LU Weidong<sup>1</sup> LU Kui<sup>2</sup> ZHANG Jun<sup>2</sup> Li Qiang<sup>3</sup> ZHAO Kangbing<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China; 2. Nanjing Landscaping Management Office, Nanjing 210008, China; 3. Nanjing Landscaping Construction Head, Nanjing 210008, China;  
4. Nanjing Gardening Landscaping Economic Development, Nanjing 210008, China)

**Abstract** Tree-like structure was a neoteric form, so it was widely used in engineering. The article summarized the feature of tree-like structure which applied to timber structures by analyzing characteristics of tree-like structure engineering both in China and abroad. The analysis of stability of tree-like timber structure was made by effective length method and some suggestions of reasonable grade bracing and the corresponding design parameters were given. By making the analysis of structural behavior of Beaverton Library, it indicated that effective length was satisfied with suggestions and it provided a reference basis for tree-like timber structure design.

**Keywords** timber structure, tree-like structure, stability, effective length

## 1 引言

树形结构是一种由分枝和树柱组成的空间支撑结构, 上部由多级分枝向三维方向伸展, 下部树柱与之相连, 因此它的形态与受力特点和自然界中的大树极其相似, “树形”之名也由此而来。树形结构最先由德国建筑师 F. Otto 在 20 世纪 60 年代提出, 是一种新型的空间结构形式, 它的特点是由多点支撑代替传统柱的单个支撑, 从而增大

了支撑空间, 并使受力更加均匀<sup>[1]</sup>。不仅如此, 树形结构所具有的仿生特点赋予了建筑生态的美感, 实现了建筑与结构的和谐统一。

正是由于树形结构所具有的形态结构优点, 建筑师将其应用于现代建筑工程实践中, 在国内外, 树形结构已经得到了越来越多的应用<sup>[2]</sup>。其中, 有一批树形结构建筑, 如美国比弗顿图书馆<sup>[3]</sup>(图 1)、意大利蒙特卡提尼的矿泉疗养大厅(图 2)等, 它们以现代工程木作为树形结构的主要材料, 将绿色环保的木材融入到了新型的建筑

收稿日期: 2014-04-27

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201304504); 南京市科技发展计划项目(201205054)

\* 通讯作者, Email:1352125718@qq.com

结构中,愈加发挥出了树形结构的生态特性。

本文介绍了几种常见的树形木结构类型,首先分析了它们的结构特点,总结出适用于木结构的树形结构特征;并对典型树形木结构进行了稳定性分析,分析了结构的失稳形式,利用有限元软件 ABAQUS 对该结构进行特征值屈曲分析,得到了不同参数下树形木结构各杆件的计算长度系数的变化规律,给出了可用于结构稳定设计的计算长度系数建议取值。最后对典型树形木结构工程美国比弗顿图书馆进行受力性能分析,为今后树形木结构的设计提供参考依据。



图 1 美国比弗顿图书馆树形支撑  
Fig. 1 Tree-like support of Beaverton library in USA

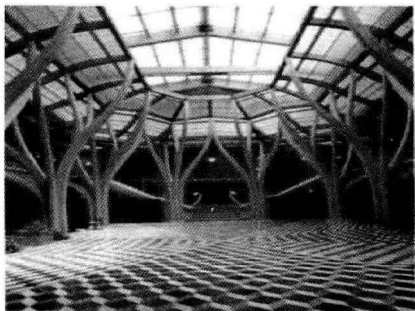

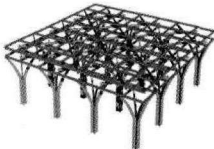



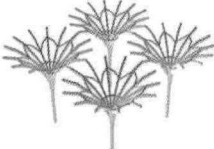




图 2 意大利蒙特卡提尼的矿泉疗养大厅  
Fig. 2 Main hall of the SPA in Montecatini Italy

2 树形结构的形态类型

树形结构由于兼具合理的受力形式与独特的艺术性价值,被广泛应用于工程实践当中,从而产生了多种的树形结构形态,有的跨度范围大,分枝众多,形式复杂;有的构件数目众多,成群排列,给人以丛林的感觉。目前常见的树形结构分为树形木结构和树形钢结构,由于木材和钢材材料性能上的不同,使得树形结构的形态具有很大差异。本文列举了国内外典型树形木结构建筑,对其形态特点进行了分析,见表 1。

表 1 典型树形结构工程特点  
Table 1 Characteristics of typical tree-like engineering

工程名称	工程图片	结构简图	形态特点
比弗顿市立图书馆			单级分枝,每个树柱采用 4 个分支组合而成,形状对称规则,柱群联合受力
慕尼黑奥林匹克游泳馆			二级分枝,多个分支组合,对称排列,单柱承载
萨格勒布机场航站楼 (方案,待建)			二级分枝,多个分支组合,对称排列,单柱承载
西贝柳斯音乐厅			上部分枝相互交错自成屋盖,多柱联合受力

从表 1 可知,以树枝分级数目分类可分为多级分枝、单级分枝及两级分枝。树形结构多级分枝可使得结构支撑范围更加广阔,造型更加美观,更加贴近“树”的形式。随之而来将会形成更多的节点,给设计和施工带来难度。目前,已建的树形结构建筑树枝分级一般不超过四级,此类建筑大多数为钢结构建筑,在节点处理上,可采用铸钢、焊接空心球、钢管相贯等方法,使得树形钢结构更多的为多级分枝。而木结构由于材性上的差异,以及传统的木结构节点连接方法无法满足多级分枝下节点的强度,因而更多地采用单级及两级分枝。

以分枝柱的数目分类,又可分为单柱式树形结构和多柱组合式树形结构。单柱式树形结构一般为混凝土柱和钢柱,这要求柱与枝连接的节点具有很高的强度,因此,多采用铸钢节点以满足其强度。多柱组合式树形结构为树形木结构普遍采用,由于木结构中单节点无法达到铸钢节点那样的强度,采用多柱组合的形式来强化枝柱节点,每个分枝柱所承担的应力都可满足其要求,并且单根枝柱容易加工,现场施工也容易拼装。

综上所述,树形木结构易采用的结构形式是单级分枝或二级分枝组合式树形结构,本文在后续树形木结构稳定性分析中将此作为研究的典型结构形式。

### 3 树形木结构的稳定性能

树形木结构通常作为承担竖向荷载的支撑结构,在其各杆件中,轴压及轴压与弯矩组合起主要作用。在设计树形木结构时,除满足自身的强度要求外,结构的稳定性需要重点考虑。

#### 3.1 树形木结构稳定性分析方法

树形木结构的稳定性分析与钢结构类似,目前常用的方法有理论求解法、提取计算长度系数法、考虑几何与材料非线性全过程分析法等。其中,计算长度系数法从杆件的几何意义与物理意义出发,简单有效,易于掌握,为广大设计人员所接受<sup>[4-5]</sup>。树形木结构的计算长度系数取值可由解析法和有限元特征值屈曲分析法求得。由于树形结构的复杂性,采用解析法建立平衡方程求解困难,有限元特征值屈曲分析法采用有限元软件可较为便捷地求得计算长度系数。

有限元特征值屈曲分析法用公式可表示为:

$$([K] + \lambda_i [K_G]) \{\varphi_i\} = 0$$

式中:  $[K]$  为结构总体刚度矩阵;  $[K_G]$  为结构在荷载作用下的几何刚度矩阵;  $\lambda_i$  为第  $i$  阶特征值;  $\varphi_i$  为第  $i$  阶屈曲模态。

其求解步骤为:① 对树形木结构进行静力分析,求得欲研究杆件的轴力  $P$ ;② 对树形木结构进行屈曲分析,得到欲研究杆件的屈曲荷载系数  $\lambda$ ;③ 欲研究杆件的屈曲荷载  $P_E = \lambda \cdot P$ ;④ 通过欧拉公式

求得该杆件的计算长度系数,即  $\mu = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{l^2 P_E}}$ 。

#### 3.2 树形木结构稳定性分析模型

根据树形木结构是否与其他结构协同作用支撑屋面,可以将其分为两类:当屋面由树形木结构独立支撑时,屋面没有水平方向约束,则树形木结构树枝顶部会有明显侧移,此时将其视为有侧移的树形木结构模型;当屋面由树形木结构和其他有水平方向约束的结构共有支撑时,则树形木结构树枝顶部侧移很小,此时将其视为无侧移树形木结构模型。在实际工程中,由树形结构支撑的廊亭等建筑属于有侧移的树形结构;由树形结构支撑的大跨建筑属于无侧移的树形结构。两类模型如图 3 所示。

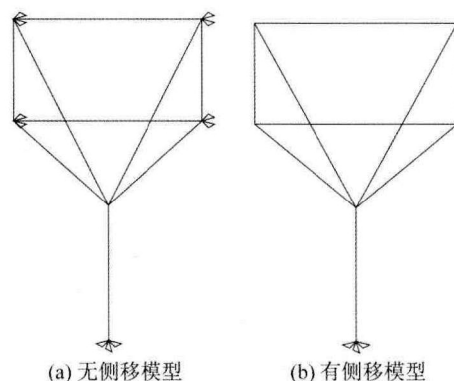


图 3 树形木结构无侧移模型与有侧移模型

Fig. 3 Models of tree-like timber structure with and without lateral drift

#### 3.3 树形木结构稳定性分析参数

影响树形木结构计算长度系数取值的因素有树形木结构支撑的跨度、树形木结构的树枝高度以及树枝与树柱的截面刚度。综合考虑各因素,拟定分析参数为:跨高比  $\eta = L/H_1$ , 枝柱高度比  $\beta = H_1/H_0$ , 截面刚度比  $\xi = I_1/I_0$ , 见图 4。通过有限元软件 ABAQUS<sup>[6]</sup> 计算不同参数影响下树形木结构各杆件计算长度系数取值结果见图 5—图 7。

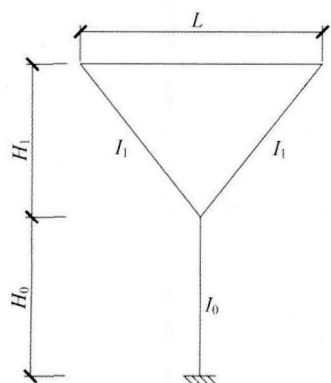


图 4 树形木结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of tree-like timber structure

图 5 表示枝柱高度比  $\beta$  对树形木结构计算长度系数的影响。有侧移结构与无侧移结构中，树柱的计算长度系数与枝柱高度比  $\beta$  成正比变化；树枝计算长度系数与枝柱高度比  $\beta$  成反比变化，且  $\beta$  在 1.0 ~ 1.5 区间内变化较缓。综合考虑树柱与树枝计算长度系数，建议枝柱高度比在 1.0 ~ 1.5 之间选择。

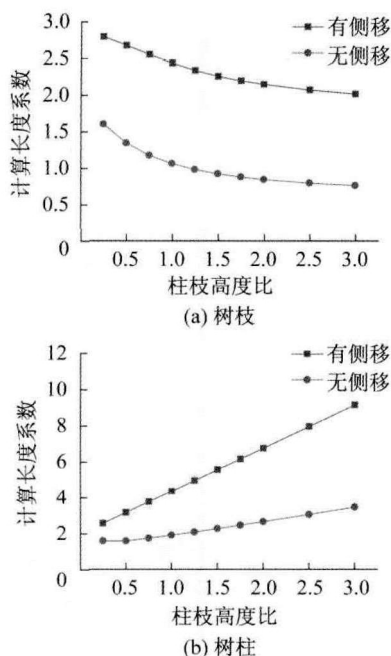
图 5 枝柱高度比  $\beta$  对树形结构计算长度系数的影响Fig. 5 Influence of  $\beta$  on effective length

图 6 表示截面刚度比  $\xi$  对树形木结构计算长度系数的影响。有侧移结构与无侧移结构中，树枝与树柱的计算长度系数都与截面刚度比  $\xi$  成反比变化，且  $\xi$  在 0.2 ~ 0.4 区间内变化较缓。综合考虑树柱与树枝计算长度系数，建议截面刚度比  $\xi$  在 0.2 ~ 0.4 之间选择。

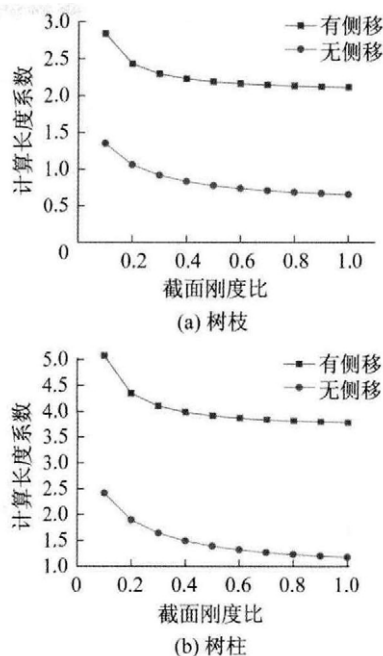
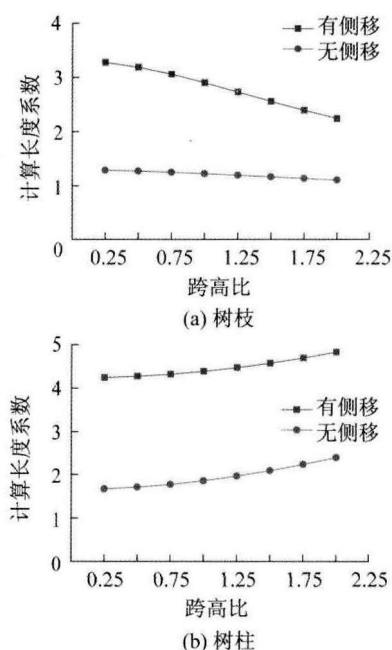
图 6 截面刚度比  $\xi$  对树形结构计算长度系数的影响Fig. 6 Influence of  $\xi$  on effective length

图 7 表示跨高比  $\eta$  对树形木结构计算长度系数的影响。有侧移结构中，树柱的计算长度系数与跨高比  $\eta$  成正比变化，树枝计算长度系数与跨高比  $\eta$  成反比变化；无侧移结构中，跨高比对树柱和树枝计算长度系数的影响趋缓。考虑工程实践情况，建议跨高比在 0.5 ~ 1.5 之间选择。

图 7 跨高比  $\eta$  对树形结构计算长度系数的影响Fig. 7 Influence of  $\eta$  on effective length

综合图 5—图 7 树形木结构中各杆件的计算长度系数受枝柱高度比  $\beta$ 、截面刚度比  $\xi$  和跨高比  $\eta$  的影响,取值变化范围较大,且有侧移树形木结构与无侧移树形木结构中计算长度系数差别很大,在工程设计时应结合具体情况进行特征值屈曲分析,取值时应考虑安全与经济性。若树形木结构的枝柱高度比  $\beta$ 、截面刚度比  $\xi$  和跨高比  $\eta$  的取值符合上述建议范围,则有侧移结构中,树枝计算长度系数可偏安全地取 2.5,树柱计算长度系数可偏安全地取 4.0;无侧移结构中,树枝计算长度系数可偏安全地取 1.5,树柱计算长度系数可偏安全地取 2.0。

4 工程算例

4.1 工程概况

比弗顿市立图书馆位于美国俄勒冈州比弗顿市,建筑面积 6 400 m<sup>2</sup>,主要采用木材与混凝土材料,混凝土用于基础与主要承重墙,木材用于屋面板与屋面下部的树状支撑结构。建筑共有 16 个树状柱支撑屋面,柱高 7.990 m,每个树状柱由 4 个分枝组合而成,这些分枝都由 3/4 英寸(1.905 cm)厚的花旗松层板叠落胶合而成。屋面采用平面网格结构,木檩条截面尺寸为 13 cm × 30.5 cm,构成 4.27 m × 4.27 m 的矩形网格。

4.2 计算模型

本工程树形结构树桩截面尺寸、树枝变截面尺寸见表 2,计算模型见图 8。

表 2 树形支撑截面设计		
Table 2 Cross section design of tree-like support		
tree-like support		
mm		
构件	截面高 × 宽	长度
树枝梢部	178 × 225	5 004
树枝端部	1 000 × 225	
树柱	717 × 225	4 000

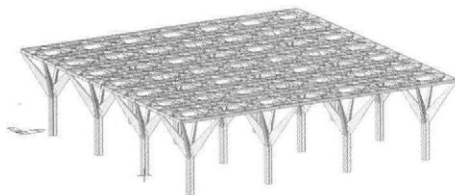


图 8 比弗顿树形支撑模型  
Fig. 8 Tree-like support model of Beaverton

4.3 树形结构内力及稳定性分析

本文利用结构计算软件 Midas Gen 8.0,考虑在恒载 + 活载荷载组合作用下,对比弗顿树形支撑进行结构计算,其中,恒载取 2.0 kN/m<sup>2</sup>,活载取 0.5 kN/m<sup>2</sup>。通过对该结构进行静力分析表明,树枝与树柱以承受轴力与弯矩为主(图 9),轴力与弯矩大小从树柱到树枝衰减很快,树形木结构内力及变形均满足要求。前二阶屈曲模态如图 10 所示,分析得到的树形结构中树柱计算长度系数为 1.98,树枝计算长度系数为 1.12,均在树形木构计算长度系数建议取值的范围内。分析结果如表 3 所示。

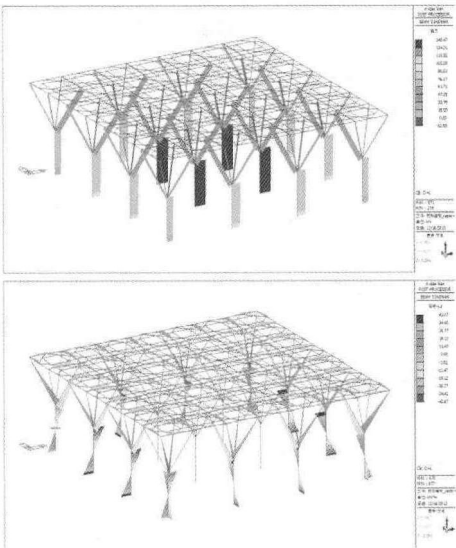


图 9 轴力与弯矩图  
Fig. 9 Axial force and bending moment diagram

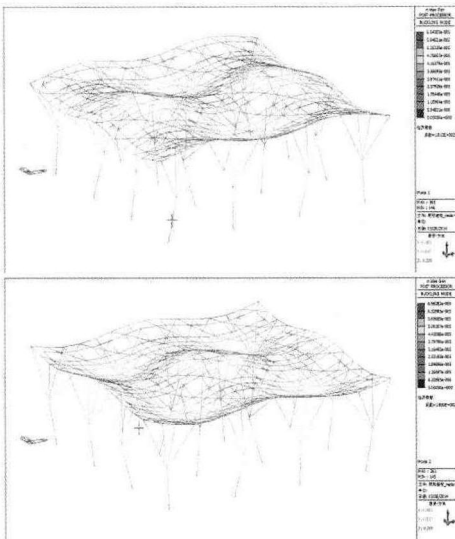


图 10 前两阶屈曲模态  
Fig. 10 The first and second order of buckling mode

表 3 比弗顿图书馆树形结构计算长度系数

Table 3 Effective length of Beaverton library

杆件	轴力 /kN	弯矩 / (kN · m)	屈曲荷载 / kN	杆件长度 / mm	计算长 度系数
树柱	148.47	42.07	12 629.7	4 000	1.98
树枝	54.02	19.09	4 595.5	5 004	1.12

## 5 结 论

(1) 通过对国内外知名树形结构建筑结构特点总结,适用于木结构的树形结构形式是单级分枝或二级分枝组合式树形结构。

(2) 在树形木结构稳定性分析中,通过有限元软件 ABAQUS 对树形木结构进行数值模拟,得到树形木结构在枝高比、跨高比和截面刚度比参数影响下,树形结构各杆件计算长度系数可偏安全取值:有侧移结构中,树枝取 3.0,树柱取 5.0;无侧移结构中,树枝取 1.5,树柱取 2.0。

(3) 通过对树形木结构典型工程——美国比弗顿图书馆受力分析表明,该种树形结构内力及变形均满足要求,各杆件计算长度系数也符合取值范围,稳定性能良好。

## 参考文献

- [1] 张金铭,陈思作,蔺俊强. 钢管树状支撑结构的形态分析[J]. 武汉大学学报(工学版) 2009, 42(2): 240-243.
- [2] 蔡长庚. 树状结构在公共建筑中的应用[J]. 工程建设与设计 2002, (3): 3.
- [3] Cai Changeng. Application of tree structure in public buildings [J]. Engineering Construction and Design, 2002, (3): 3. (in Chinese)
- [4] APA-The Engineered Wood Association. Beaverton City Library: A Forest of Glulam[R]. Case Study 2001.
- [5] 陈骥. 钢结构稳定理论与应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [6] Chen Ji. Stability of steel structure theory and design [M]. Beijing: Science Press, 1994. (in Chinese)
- [7] 王忠全, 陈俊, 张其林. 仿生树状钢结构柱研究[J]. 结构工程师 2010, 26(4): 21-25.
- [8] Wang Zhongquan, Chen Jun, Zhang Qilin. Research on design of dendritic columns in bionic steel structures [J]. Structural Engineers, 2010, 26(4): 21-25. (in Chinese)
- [9] 庄茁. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [10] Zhuang Zhou. Finite element analysis and application using ABAQUS [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)