

# 木屋盖结构加固改造后的有限元分析

李伟<sup>1</sup>, 宋晓岩<sup>2</sup>, 薛启超<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学后勤基建处; 2. 哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘要:** 以哈尔滨某高校 20 世纪 50 年代建造的木屋盖结构建筑为例, 在分析其残损形式的基础上, 提出加固改造的具体方法; 并借助有限元分析方法, 对结构的承载力进行重新校核。通过分析和校核结构的受力情况, 找出结构的受力薄弱位置并及时加固, 为类似的改造加固工程提供借鉴。

**关键词:** 木屋盖结构; 建筑物加固改造; 有限元分析; 可靠性鉴定

中图分类号: S781.2; TU366.2 文献标识码: B 文章编号: 1001-8654 (2017) 05-0027-05

## Wood-roof Structure Reinforcement and Finite Element Analysis

LI Wei<sup>1</sup>, SONG Xiao-yan<sup>2</sup>, XUE Qi-chao<sup>2</sup>

(1. Infrastructure Management Department, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

2. College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Based on an analysis of damage forms of wood-roof structures built in the 1950s, the authors proposed reinforcing methods for the damaged structures. Finite element analysis was applied to evaluate bearing capacity of the reinforced structures. According to the analyses, weak positions of the structures could be found.

**Key words:** wood-roof structure; building reinforcement; finite element analysis; reliability appraisal

在 20 世纪 50 年代, 在钢材非常紧缺的建国初期, 由于木材具有自重轻、加工简便、可就地取材等诸多优点<sup>[1-2]</sup>, 下部砖混、上部采用木屋盖形式的“大屋顶”式木屋盖结构在我国建筑中获得大量应用, 并成为当时重要建筑结构的主流形式。到如今, 此类木屋盖建筑已有近 60 年的历史, 大部分超出 50 年的设计基准期, 但很多仍在正常使用中。不同于钢筋混凝土结构, 木屋盖结构对温度、湿度等外部环境敏感, 为保证其使用安全性, 需逐步对现有的木屋盖结构的承载现状进行调查, 并开展相应的加

固改造工作<sup>[3]</sup>。

笔者参与了哈尔滨某高校木屋盖结构教学楼的加固改造项目研究, 调查了木屋盖结构的现状, 发现当年设计过程中存在一些不足, 在分析木屋盖结构残损形式的基础上, 应用有限元分析<sup>[4-6]</sup>, 对结构的承载力进行了准确校核, 找出了受力薄弱部位, 并提出了加固的方法, 也为类似建筑结构的加固改造提供参考。

### 1 木屋盖结构残损形式分析及加固方案

该教学楼平面呈“日”字形, 建于 1954 年, 建筑面积约 4.8 万 m<sup>2</sup>, 系 5~6 层砖混结构和木屋盖体系。屋盖为传统的歇山式大屋顶, 曾于 2005 年进行了改造修复, 将铁皮屋面更换成 s 形瓦屋面, 但使屋架上的荷载随之增大。

收稿日期: 2017-02-17; 修改日期: 2017-08-14

基金项目: 国家自然科学基金“间歇循环载荷下粘弹性夹芯夹层结构的疲劳破坏机理研究”(51409056); 黑龙江省自然科学基金“基于粘弹性本构关系的碰撞力分析方法”(E2015047)。

作者简介: 李伟 (1976—), 男, 哈尔滨工程大学工程师。

### 1.1 结构残损状况

木屋盖结构包含的构件有：檩条、椽条、望板和钢木屋架。经实地调查发现，主要残损形式：

1) 砌在砖墙中的木梁、木屋架支座和椽条等构件，因通风不良而出现不同程度的腐朽，以木梁两端支座的腐朽最为严重。

2) 屋面局部漏雨导致构件腐烂，如木望板、屋架支座垫木及支座节点腐烂，造成屋架失效。

3) 木材干裂、干缩造成结构构件损伤和变形，如个别端支座为单齿连接的屋架，因下弦干裂导致抗剪承载力不足<sup>[7]</sup>。

4) 修缮不当造成损害。

5) 原设计欠缺导致结构强度不足。各区域木屋架均未设上弦横向支撑，影响屋盖体系的纵向刚度，不能保证风荷载等侧向荷载的传递；个别屋架上弦杆采用斜搭接接头，不符合现有木结构设计规范的要求。

### 1.2 加固改造方案

针对木屋盖残损的主要形式，提出如下加固改造措施。

1) 增设屋架上弦横向支撑。

除房屋两端各设一道支撑外，中间每隔 20~30 m 增加一道支撑。

2) 拆除原有屋架下弦节点附近增设的错误支座，屋架下弦底表面 100 mm 内不得有任何支顶物。

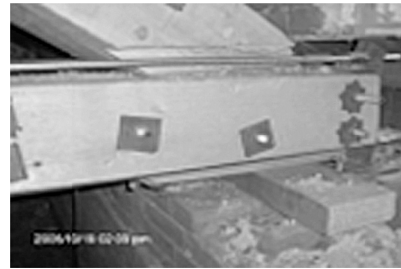
3) 加固屋架。

单齿连接端节点的抗剪承载力不足者，及抗剪区段有干裂者或腐朽者，采用钢套环或改为蹬式节点加固（图 1a）；屋架端节间上弦，均增设斜腹杆，减少节间荷载的弯矩作用。对个别屋架上弦端节间承载力仍不够者，用增大截面法进一步补强（图 1b）；还可采用零杆加固（图 1c）等方法。

4) 加固或更换檩条。

凡椽条承载力不足或变形严重，不能满足使用要求的，在跨中加设拉条，减少屋面平面内的弯矩作用；还可改作钢拉杆组合檩条或增加檩条数量，减少椽条跨度。

对于穿墙椽条，若与墙体接触部分存在腐朽现象，应视其腐朽程度不同，换新或夹板加固，并进行防腐处理。



a 蹬式节点加固



b 斜撑杆加固



c 零杆加固

图 1 木屋盖结构构件加固措施

Fig.1 Reinforcement measures of wood-roof structure components

## 2 改造后木屋盖静荷载作用下的有限元分析

在实际工程改造中，施工往往主要只针对屋面漏雨、木材腐蚀等容易直接观察到的残损进行加固改造，但无法直接确定改造后木屋盖结构的受力薄弱位置分布及安全性。采用有限元分析，对屋盖结构进行重新承载力校核，可找出受力薄弱位置并确认是否需要加固。

### 2.1 荷载分析

目前，对既有房屋超期服役后的设计评估尚无相应的国家标准，故只能对两楼采用偏于保守的设计验算方法。

本着木屋盖改造后继续使用 30 年的目标，即从 20 世纪 50 年代起计算，按设计使用年限为 90 年的新结构要求来进行分析。木屋盖结构所受的水平荷载为风荷载，竖向荷载则包括屋面自重、屋面活荷

载和雪荷载等。考虑到该结构所在地区常年的风荷载较小，且建筑物非高层建筑，水平荷载的影响可忽略不计，所以笔者仅对屋盖结构的竖向荷载进行了有限元分析。同时，利用有限元计算，不仅要确定木屋盖结构所受竖向荷载的数值，而且还要检测木材强度，根据木材测试结果，确定在有限元中木材的材料标准值。

### 2.1.1 竖向荷载分析

竖向木屋盖结构由琉璃瓦、挂瓦层、屋面平板、檩条和椽条层组成，屋面坡度约为 35°，见图 2。

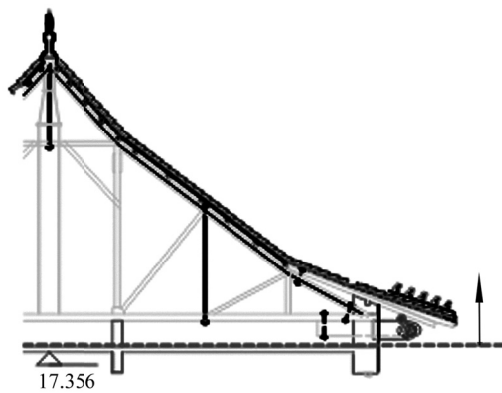


图 2 木屋盖典型屋顶剖面图

Fig.2 A typical wood-roof structure profile

屋面单位面积上永久荷载为 0.98 kN/m<sup>2</sup> (其中琉璃瓦 0.21 kN/m<sup>2</sup>，挂瓦层 0.45 kN/m<sup>2</sup>，檩条、椽条 0.32 kN/m<sup>2</sup>)，换算成投影方向的竖向永久荷载为：0.98 kN/m<sup>2</sup>/COS 35°=1.2 kN/m<sup>2</sup>。

根据 GB 50009-2012《建筑结构荷载规范》，不上人屋面的活荷载标准值为 0.5 kN/m<sup>2</sup>，但考虑修理琉璃瓦时荷载较大，故屋面活荷载调整为 0.7 kN/m<sup>2</sup>；雪荷载标准值为 0.3 kN/m<sup>2</sup>，由于屋面活荷载大于雪荷载，所以荷载组合仅采用屋面活荷载。

参考 GB 50009-2012《建筑结构荷载规范》计算荷载组合，式 1 与 2 为按可变荷载控制或永久荷载控制的计算方法。

$$S = \gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qik} \quad (1)$$

$$S = \gamma_G S_{Gk} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qik} \quad (2)$$

式中： $\gamma_G$ —永久荷载分项系数， $S_{Gk}$ —永久荷载效应标准值， $\gamma_{Qi}$ —第*i*个可变荷载分项系数， $S_{Qik}$ —第*i*个可变荷载效应标准值， $\psi_{ci}$ —荷载组合值系数。

结果取两者中的最大值，所以按永久荷载效应控制的组合计算，则竖向荷载在投影面上的荷载设计值为 2.6 kN/m<sup>2</sup>；教学楼结构重要性系数  $\gamma_0$  取为 1.1，因此，进行有限元静力分析时，施加的竖向荷载值为：2.6×1.1=2.86 kN/m<sup>2</sup>。

### 2.1.2 木材强度检测

现场调查发现，木屋盖各承重构件均为红松木材，屋盖各区域所用木材材质基本相同。因此，在一些非承载作用的木构件上，共截取了 32 段木材，尺寸不小于 120 mm×120 mm×800 mm，加工成拉、压、弯及横纹受压等标准试件 244 个，按 GB/T 50239-2002《木结构试验方法标准》的规定，进行含水率和力学性能测定。结果列于表 1。

表 1 木材力学性能的测试结果

Tab.1 Testing results of mechanical properties of wood-roof structures

力学指标	试件数量	含水率均值/%	实测均值/MPa	修正均值/MPa	标准方差/MPa	标准值/MPa	设计值/MPa	TC13 (B)等标准值
抗弯 $f_m$	38	6.05	71.08	54.16	8.44	40.29	15.47	13
顺纹抗压及承压 $f_c$	30	6.16	49.54	34.50	5.00	26.27	14.52	10
顺纹抗拉 $f_t$	66	5.31	86.04	77.38	22.91	39.69	15.24	8
横纹承压 $f_{c,90}$	72	-	6.08	6.08	1.18	4.13	2.97	2.9
弹性模量 $E$	38	6.05	10362	9436	-	-	-	9000

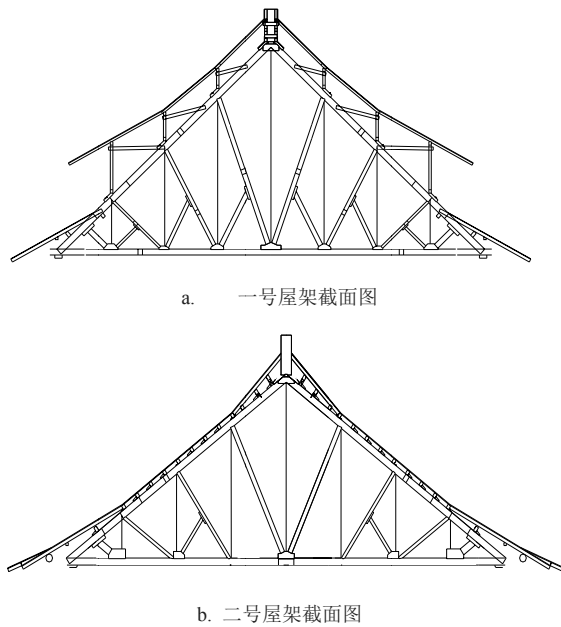
根据试验结果，计算获得的各项力学指标设计值均高于现行 GB 50005-2003《木结构设计规范》中对 TC13 (B) 级木材的要求。因此，屋盖承重构件的木材强度设计值，可按 TC13 (B) 等木材的标准值取用。

### 2.2 静荷载工况模拟

荷载分析确定了有限元计算中的荷载值和木材材料标准值，此外，还需对木屋盖在有限元中具体建模进一步确定，因此，要对结构进行静荷载下的工况分析。

图 3 为两种支撑方式的典型屋盖截面图，其改造后的力学状态分析利用 ANSYS 软件进行有限元建模。结构由梁、板和拉杆构成，梁和屋面板材料为松木，钢拉杆采用的是 Q235 钢材。

为了计算方便，不考虑某些受损构件截面的变化和刚度的下降，根据松木力学性能测试结果的强



a. 一号屋架截面图

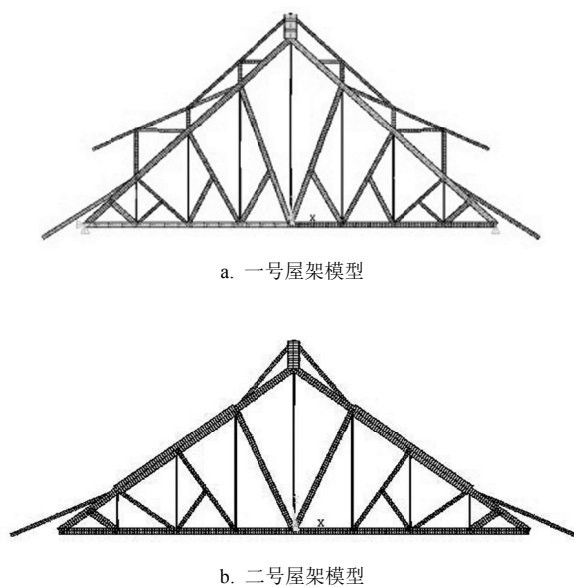
b. 二号屋架截面图

图3 屋架截面图

Fig.3 Roof truss cross section

度等级,考虑结构剪切变形的影响,使用 BEAM188 单元来模拟木质屋梁,用 SHELL63 单元来模拟屋面结构,用 LINK10 单元来模拟拉杆。

Beam188 是 ANSYS 软件中三维线性有限应变单元,是基于铁木辛柯的梁结构理论<sup>[8]</sup>,而且考虑剪切变形的影响;Shell63 是弹性壳单元,既具有弯曲能力,又有薄膜特性,可以承受面内荷载或法向荷载;将 LINK10 单元设定为只受拉而受压和抗弯的单元。屋架模型见图 4。



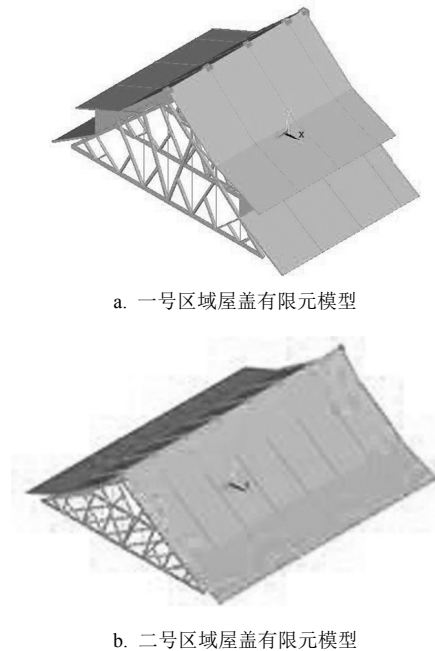
a. 一号屋架模型

b. 二号屋架模型

图4 两种典型屋架的有限元模型

Fig.4 Two typical roof trusses finite element models

屋架所在的区域一共有 5 榀屋架,屋架之间有檩条和椽条相连,形成新型空间结构,以防止发生过大的侧向变形。某些屋架之间还有水平布置的斜连接杆。所建立的屋盖有限元模型,如图 5 所示。



a. 一号区域屋盖有限元模型

b. 二号区域屋盖有限元模型

图5 两种典型屋盖的有限元模型

Fig.5 Finite element models of two typical wood-roof structures

### 2.3 有限元分析

把荷载分析得到的数值,代入到静荷载工况分析的两种模型中进行有限元计算,结果如下。

#### 2.3.1 一号屋盖

一号屋盖在有限元计算中的荷载响应,见图 6。

图 6a 为屋盖整体位移图。模型的最大位移在上层屋檐处,依据 GB 50005-2003《木结构设计规范》,主梁的最大变形应为:

$$f = \frac{l^2}{2400h} = \frac{17.23^2}{2400 \times 0.22} = 0.56\text{m} = 560\text{mm} \quad (3)$$

主梁的最大侧向变形为:

$$l = 17.23/150 = 0.11\text{m} = 110\text{mm} \quad (4)$$

所有木架单元的节点中,最大竖向位移为 101 mm,最大侧向位移为 8.0 mm。由此可知,一号屋盖的主梁的竖向和侧向变形程度,都在容许的范围之内,屋盖的刚度亦满足要求。

由图 6d 屋面的 Mises 应力可知,屋面上屋檐处有明显的应力集中,最大应力位于屋檐的边缘处,

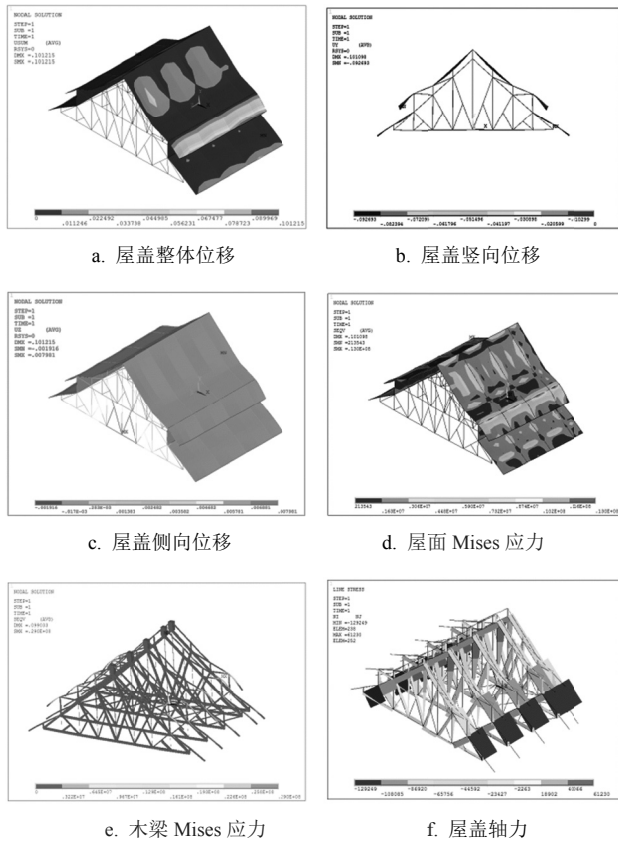


图6 一号屋盖有限元分析

Fig.6 Finite element analysis of wood-roof structure type I

达 13 MPa; 图 6e 屋盖主要木梁的 Mises 应力图亦显示, 应力最大的木梁同样位于屋檐处, 为 29 MPa。

图 6f 屋盖轴力分布表明, 屋盖中的危险梁主要集中在屋檐边缘上。对于这种情况, 可以通过增设横向支撑来分担结构受力的方法加固结构。

### 2.3.2 二号屋盖

如图 7 所示, 二号屋面的最大应力集中在屋面中间屋梁与屋面的结合处, 达 10 MPa; 木梁的最大 Mises 应力值位于屋架边缘的梁, 为 7.6 MPa, 与一号屋有所不同, 这是由于二号屋架的屋檐外伸距离较短造成的。

图 7f 屋盖轴力分布显示, 承受最大轴力的梁位于支座处斜梁。由此可知, 二号屋盖的受力薄弱位置在屋面和支架处, 是加固改造的重点, 可以通过增设檩条或竖向支撑的方式实施改造。

## 3 结语

通过有限元分析发现, 木屋盖整体结构在载荷作用下, 受力薄弱位置集中在屋面屋檐和中间屋架

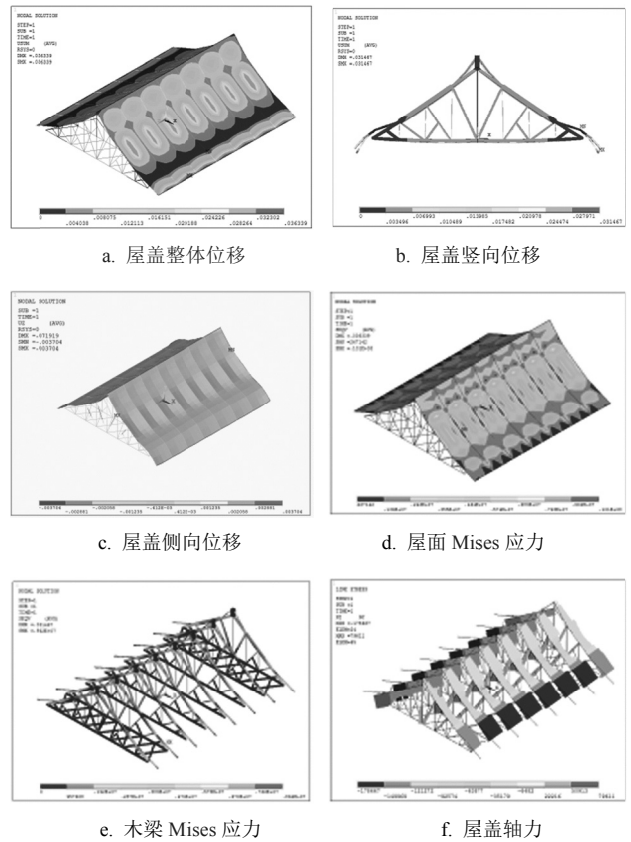


图7 二号屋盖有限元分析

Fig.7 Finite element analysis of wood-roof structure type II

处, 可通过增设水平或竖向支撑及檩条的方式来加固结构。在使用过程中要定期检查, 及时发现安全隐患并采取措施, 以保证结构安全。

### 参考文献:

- [1] 樊承谋, 张盛东, 陈松来. 木结构基本原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] MA Jun-li, ZHU Jun. Application and development of wood structure building in Xinjiang landscape architecture[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44 (4): 206-207, 261.
- [3] 刘中, 刘怀斌. 某校学生宿舍木屋盖鉴定与加固[J]. 建筑设计管理, 2016 (4): 89-92.
- [4] Na Y, Yang W, Qin S. Finite element analysis of hall-style ancient wooden structure considering damage factors[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39 (1): 40-51.
- [5] 岳元元. 清代徽派木结构古民居塑性有限元分析[J]. 安徽建筑, 2015, 22 (3): 143-145.
- [6] 胡家航, 强添润, 郭明辉. ANSYS 在木结构构件中的应用[J]. 世界林业研究, 2016, 29 (3): 75-79.
- [7] 朱忠漫. 干缩裂缝对历史建筑木构件受力性能影响的试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [8] 张强. 基于铁木辛柯梁理论的接触网腕臂静力学分析[J]. 大科技, 2017 (7): 313-314.

(责任编辑 向琴)