

永乐大钟强度分析

徐永君*, 战颂, 李敏

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

解小敏, 于弢

(大钟寺古钟博物馆, 北京, 100086)

摘要: 本文首次采用 ANSYS 有限元分析软件对永乐大钟及其悬挂支撑系统建立了整体的有限元模型, 进行了静力学分析及整体强度校核。通过有限元计算, 获得了大钟各局部考察对象及整体的应力、位移分布情况和各部分的静强度, 为合理撞钟和整体维护加固提供了科学依据与技术指导。

关键词: 永乐大钟; 有限元; ANSYS; 强度分析;

Strength Analysis on Yongle Bell

Yongjun XU*, Song ZHAN, Min Li

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, P. R. China

Xiaomin XIE, Tao YU

Big Bell Temple Museum, Beijing 100011, P. R. China

ABSTRACT: In this paper, the global finite element model of yongle bell and its supporting system are established for the first time by using ANSYS program. Based on the static analysis and strength analysis, stress status, displacement distribution and static intensity of the bell, hanging system and supporting system are obtained, and which provide a scientific basis and technical guidance for ringing the bell and reinforcing the whole structure.

Keywords: yongle bell; finite element methods; ANSYS; strength analysis;

1 引言

“中国钟王”——永乐大钟, 钟声洪亮, 音质清晰。钟身铸有 23 万字的佛经和梵文, 举世罕见, 是珍贵的历史资料。永乐大钟诞生于 600 年前(明代永乐年间), 通高 6.75 米, 口径 3.3 米。运用陶范法, 采用雨淋式浇注方式浇注, 并在蒲牢中加入钢芯, 整个钟体一气呵成, 铸造工艺令人惊绝。永乐大钟经历几百年沧桑变迁, 历经三次搬迁, 1743 年由万寿寺移至觉生寺(现大钟寺), 至今已悬挂于大钟寺内 260 多年。永乐大钟及其悬挂系统重 46 吨多, 悬挂于木架结构上, 历经各种磨难, 特别是在 1976 年唐山大地震波及北京比较严重的情况下不倒不损, 实在是我国古代建造学和力学的典范。永乐大钟是大钟寺博物馆的镇馆之宝, 也是我国的重要文物, 融会了我国古代多种学科的精髓, 体现了古代劳动人民的精湛技艺^[1-7]。

作者简介: *徐永君(1964.10), 男, 河北人, 副研究员, 博士, 主要从事疲劳断裂和结构力学等研究(E-mail: yjxu@imech.ac.cn);

战颂(1982), 女, 吉林人, 硕士研究生, 主要从事钢包混凝土理论与数值计算研究工作;

李敏(1982), 女, 山东人, 硕士研究生, 主要从事层状复合材料弱层界面断裂力学研究。

大钟顶部悬挂钟体的是由上下两个 U 型环通过方形销钉连接成的整体结构,支撑系统为全木质梁柱组合框架结构。由于年代久远,支撑框架已有木质老化、开裂的情况,从文物保护的角度和安全的需要,对永乐大钟的研究和保护是一件十分必要且具有重要意义的工作。利用有限元方法对永乐大钟及其悬挂支撑系统进行静力学和大钟撞击过程的动力学分析研究,是对永乐大钟的整体保护、维护维修、加固预防的一项基础性研究,是判断大钟承载能力和现状的依据,可以对永乐大钟的整体保护、维护维修、加固预防进行指导。文献[8-9]利用结构力学方法对悬挂系统中的销子和销芯局部进行了简单的力学分析,给出了销钉系统悬挂安全强度的初步估计,由于不能很好地模拟销钉系统的实际受力,估计值的偏差较大。由于建模的难度和工作量的巨大,所以对永乐大钟、悬挂系统及其木结构支架的整体力学分析和强度校核还没有人尝试过。本文首次采用 ANSYS 有限元分析软件对永乐大钟及其悬挂支撑系统建立了整体的有限元模型,进行了静力学分析及整体强度校核。

2 整体有限元模型建立及网格划分

建模假设: 尽管支撑木架各构件间除榫接外,都是搭接在一起,但承受重力引起的挤压力较大,特别是在静力作用下,不可能发生错动和脱离现象,所以按连接处理对分析计算结果没有影响。

建模及网格划分原则: 保证接触面间单元节点相互对应重合。

建模方式: 化整为零,合零为整。

建立模型过程中的详细尺寸来源于文献[10-11],部分来源于现场测量结果。

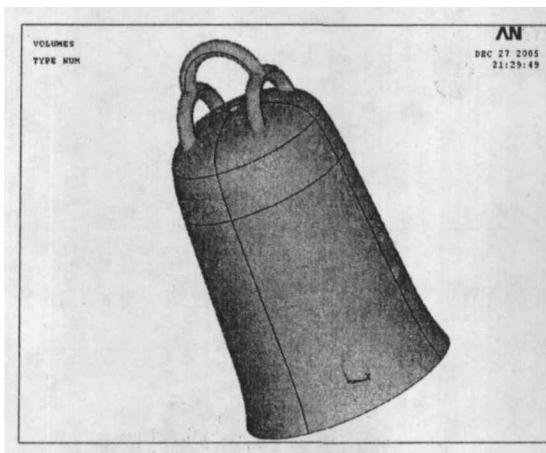


图 1 钟体及钟钮模型示意图

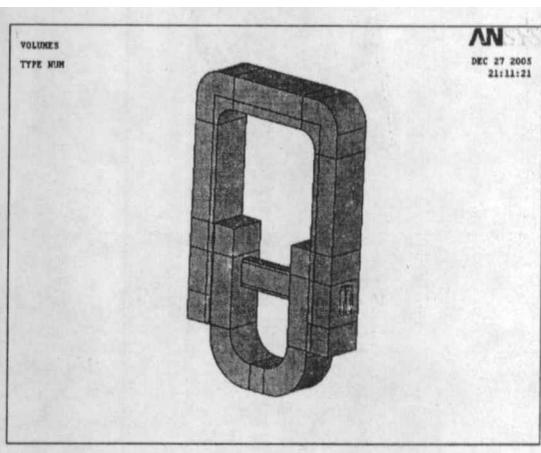


图 2 上、下 U 型吊挂及销子模型示意图

永乐大钟整体结构可分为两大部分,即木架结构部分和金属结构部分。金属结构部分又可分为钟体结构和吊挂系统,吊挂系统由上 U 型吊挂和下 U 型吊挂及销钉几部分组成,其中销钉为铜包钢结构,外为铜,内销芯为钢。为了满足建模原则要求,本文将每部分根据相互接触和连接关系进行详细分解,将整个系统分为木架结构模型,钟体模型,销子及销芯模型,上下 U 型吊挂模型四部分,分别建模。图 1 所示为永乐大钟钟体结构模型、图 2 所示为吊挂系统结构模型、图 3 所示支撑结构系统整体模型,如图 4 所示为合并后的整体结构模型。

建模有多种方法,但要以有利于计算的原则为前提,为了有利于在实际计算中采用规则的单元类型进行网格划分,并保证接触面上生成的结点相互匹配,建立梁、柱、U 型环、销子模型时采用了分块建立端面,再沿分段拖拉线拖拉成体的方法。以钟体吊挂梁为例详细阐述建模过程,中部有挂 U 型环的凹槽,是木架结构中比较难处理的一根梁。首先根据该梁的截面尺寸、凹槽形状建立分块的端面模型,如图 5 所示,而后根据该梁的总长度、凹槽宽度以及与其他梁的接触宽度等建立分段的拖拉线,如图 6 所示,端面的内外层分别沿拖拉线拖拉就生成了图 7 所示三维实体模型。

单元类型选取和划分网格是有限元分析的重要环节,本文主要选用 SOLID45 三维实体单元,只有连

接 8 根柱子的 4 根截面面积比较小且受力比较简单的连接梁采用 BEAM44 单元。钟体采用自由网格, 其余采用规则网格自上而下进行划分, 整体网格如图 8 所示。

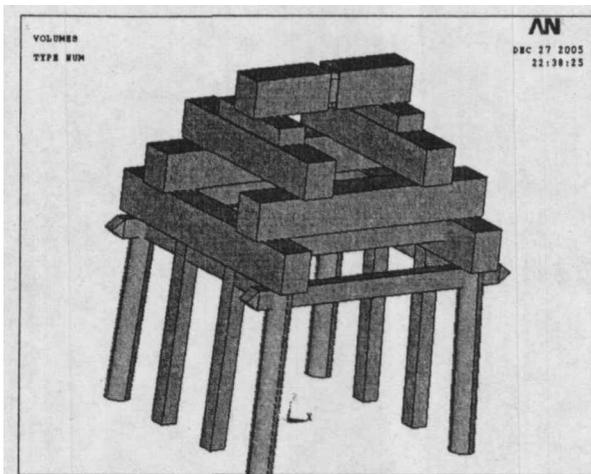


图 3 永乐大钟支撑系统木架结构模型示意图

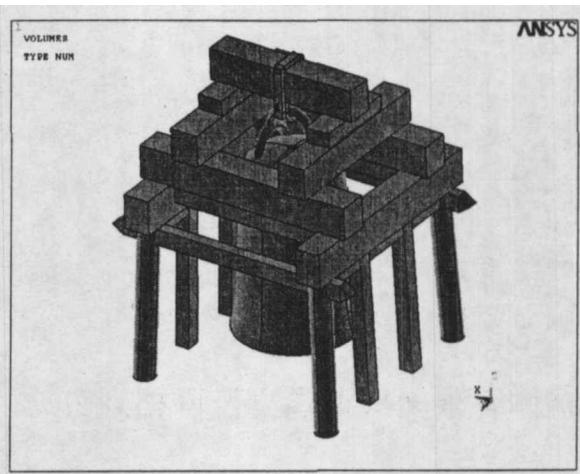


图 4 永乐大钟、吊挂结构、支撑结构整体模型示意图

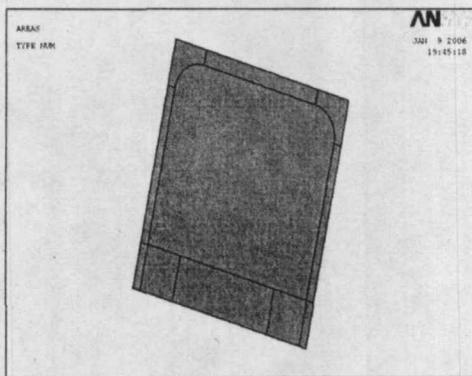


图 5 钟体吊挂梁端面模型示意图

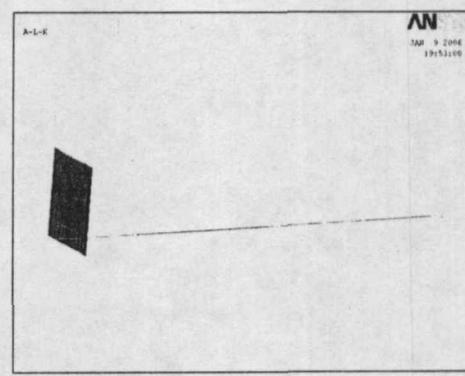


图 6 钟体吊挂梁端面及拖拉线模型示意图

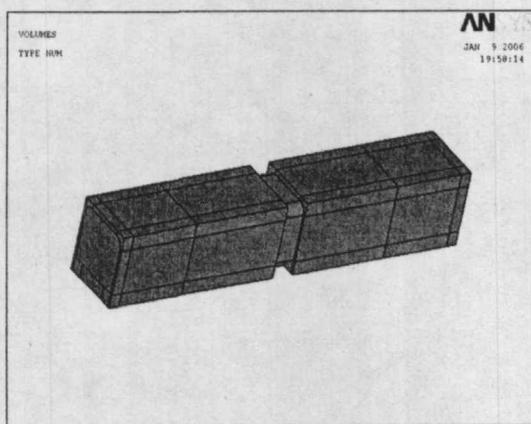


图 7 钟体吊挂梁模型示意图

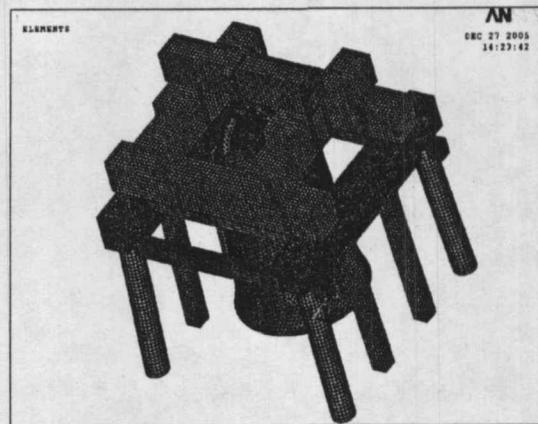


图 8 有限元单元划分示意图

3 整体有限元静力计算

由于 8 根柱子是安放在有榫槽的石鼓基础上, 所以对柱子底部施加固定约束, 对整体施加重力荷载进行静力分析。表 1 给出了各考察对象的六个应力分量 and 第 1、第 3 主应力的最小值和最大值。图 9 给出了整体结构位移分布示意图。详细结果可参见文献[7]。

表 1 各考察对象的六个应力和第 1、第 3 主应力的最大值和最小值

考察对象		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)	τ_{xy} (MPa)	τ_{yz} (MPa)	τ_{xz} (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
钟体	Min	-18.5	-9.50	-12.6	-1.86	-8.43	-7.34	-7.25	-19.2
	Max	19.7	17.1	17.7	1.98	8.70	7.49	20.6	19.6
吊挂	Min	-10.6	-26.2	-19.5	-8.48	-33.9	-8.35	60.8	0.65
	Max	27.0	61.8	51.4	9.83	36.0	11.2	89.5	17.4
销芯	Min	-3.06	-29.8	-0.95	-14.7	-0.85	-8.46	-1.64	-24
	Max	3.14	9.63	23.7	0.95	14.1	1.27	32	-0.24
木架	Min	-6.53	-2.30	-1.96	-1.36	-1.01	-2.35	-1.05	-6.71
	Max	8.64	1.02	2.26	1.37	1.01	2.15	9.50	0.29

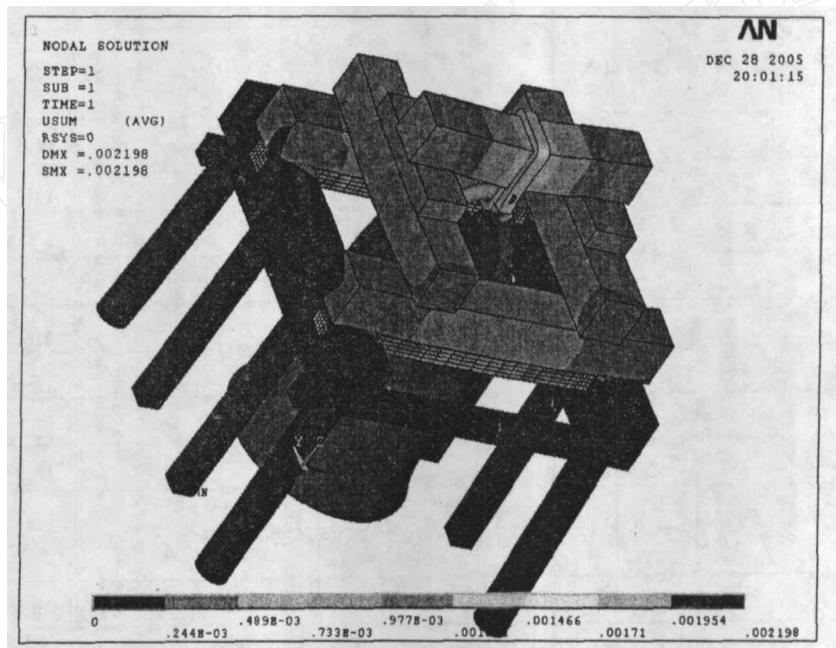


图 9 整体结构位移分布示意图

长期以来，大钟各部分的重量一直都是一个谜，特别是钟体本身多重存在着各种说法。本文对大钟钟体、钟钮、悬挂系统及整个支撑木架结构的体积和重量分别进行了计算(估算)。在计算过程中，考虑到刻字引起的阴亏及钟体下沿在建模时没有考虑莲花形状，所以铜的平均密度取青铜统计结果最小值 8200kg/m^3 (统计结果： $8200\sim 8800\text{kg/m}^3$)，销芯钢的密度取为 7850kg/m^3 ，木结构密度统一取为 500kg/m^3 。计算结果见表 2。

表 2 永乐大钟、吊挂结构、支撑结构系统体积和重量

构件	体积 (m^3)	重量 (t)
钟体	5.286	43.343
钟钮	0.274	2.246
悬挂(无销芯)	0.169	1.386
销芯	0.00404	0.0317
金属结构合计	5.707	46.795
木架结构	35.184	17.592

4 静力强度评估

表3给出了各种铜、铸铁及普通碳素钢及木材的屈服强度 σ_s 、抗拉强度 σ_b 、剪切强度 τ_s 的统计值。大钟寺博物馆提供的文献[4-5,9]给出的金属成分测定为铜锡合金(含锡16.4%、铅1.12%、铜80.54%)，比较接近于ZQSn10-1铸铜，取 $\sigma_s = 140\text{MPa}$ 、 $\sigma_b = 200\text{MPa}$ ；销芯从安全的角度出发，取钢和铸铁中最小的 $\sigma_s = 120\text{MPa}$ 、 $\sigma_b = 169\text{MPa}$ ；木结构取 $\sigma_s = \sigma_b = 30\text{MPa}$ ^[12-13]。根据静力计算结果，利用最大主应力强度准则和最大剪应力强度准则进行安全评估，表4给出了评估结果，安全系数为屈服强度与最大值之比。

表3 各种铜、铸铁及普通碳素钢的屈服强度、抗拉强度、剪切强度、木材统计值

名称	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	τ_s (MPa) $\tau_s = \sigma_s/2$
黄铜	70-550	200-620	35-275
青铜	82-690	200-830	41-345
铜及其合金	55-760	230-830	27.5-380
铸铁	120-290	169-480	60-145
普通碳素钢	215	335-450	107.5
杉木	30-50	40-70	15-25
橡木	30-40	30-50	15-20
松木	30-50	40-47	15-25

表4 永乐大钟整体结构中铜、钢及木结构静力安全评估结果

名称	最大主应力强度准则			最大剪应力强度准则		
	σ_{\max} (MPa)	σ_s (MPa)	安全系数	τ_{\max} (MPa)	τ_s (MPa)	安全系数
铜	89.5	140	1.564	36	70	1.944
钢	32	120	3.75	14.7	60	4.082
木	9.5	30	3.158	2.35	15	6.383

5 结语

1. 永乐大钟及其悬挂系统和支撑木结构的体积估算分别为：大钟及其悬挂系统(金属结构部分)合计为 5.7m^3 ；木结构体积为 35.2m^3 。
2. 永乐大钟及其悬挂系统和支撑木结构的重量估算分别为：大钟及其悬挂系统(金属结构部分)合计约为46.8吨；木材密度按 $0.5\text{吨}/\text{m}^3$ 计算，则木结构重量约为17.6吨。
3. 静力分析结果显示，整体结构均能满足最大主应力屈服准则和最大剪应力屈服准则。最小的屈服强度 σ_s 与主应力最大值的比值发生在销子外包铜或其附近的铜结构内，最大主应力强度准则对应的安全系数为1.56。对于剪应力也发生在销子外包铜或其附近的铜结构内，最大剪应力强度准则对应的安全系数为1.94。

4. 尽管从计算分析研究结果看, 永乐大钟处于安全状态。但对大钟的保护是必须的, 特别是木结构, 虽然计算结果显示木结构安全系数还比较高, 但与金属材料相比, 易腐朽变质。所以大钟的安全性就在于木架支撑结构的安全, 对木架结构进行维护、维修、加固是必不可少的。

参考文献

- [1] 马法柱, 全锦云等. 古刹梵钟[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998.
- [2] 于弢. 永乐大钟三辩[M]. 北京: 北京出版社-天津出版社, 2001.
- [3] 韩战明. 永乐大钟铸造工艺探索[M]. 北京: 北京出版社-天津出版社, 2001.
- [4] 白杉, 于荫. 智慧凝聚的永乐大钟. 铸造技术[J], 2004, 25(20): 150~151.
- [5] 吴坤仪. 梵钟的研究与仿制[M]. 北京: 北京出版社-天津出版社, 2001.
- [6] 夏明明. 世界第一古老大钟新说[M]. 北京: 北京出版社-天津出版社, 2001.
- [7] 陈通, 郑大端. 永乐大钟的声学特性[M]. 北京: 北京出版社-天津出版社, 2001.
- [8] 郭康民. 永乐大钟的力学浅谈[C]. 永乐大钟讨论会材料之三. 大钟寺古钟博物馆档案资料.
- [9] 夏明明, 冯长根等. 永乐大钟悬挂结构力学问题初探. 文物[J], 1990, 7: 71~73.
- [10] 王功杰. 大钟楼钟架结构图. 大钟寺古钟博物馆档案资料. 1995.
- [11] 查济璇等. 利用超声方法测定永乐大钟寺永乐古钟的壁厚[J]. 大钟寺古钟博物馆档案资料.
- [12] 机械强度手册第二版工程材料卷[M]. 北京: 机械工程出版社, 1996.
- [13] M. F 阿斯塔诺霍夫等著, 杨秉宪等译. 飞机强度设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1959.
- [14] 徐永君, 程载斌, 战颂. 大钟结构、吊挂结构、支撑结构系统整体有限元分析(永乐大钟测量、分析及整体保护方案一分报告IV) [R], 2005.