

# Modal Analysis of a Large Scale Structural Testing Machine

HAN Jing <sup>1#</sup>, JI Jin-bao <sup>1</sup>, Ma Yu-bin <sup>1</sup>

1. Beijing Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China  
#Email: hanjing\_1129@163.com

## Abstract

In order to better understand dynamic characteristics of the structural testing system in Beijing University of Technology, ABAQUS software was adopted to build a mechanical finite element model of the system. Static analysis under real loading and modal analysis was conducted and the 4 natural frequencies and modes of the model were obtained. The influence on natural vibration characteristics by rack stiffening plates of the structural testing machine was studied. The studies of this paper may be useful for designing and functional improvement of structural testing machines.

**Keywords:** Testing Machine; Finite Element Model; Modal Analysis

## 某大型结构试验机动力特性分析\*

韩静<sup>1</sup>, 纪金豹<sup>1</sup>, 马玉彬<sup>1</sup>

1. 北京工业大学 建筑与土木工程学院 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124

**摘 要:** 为了更好的了解试验机的动力特性, 针对北京工业大学 4000 吨多功能结构加载系统, 利用 ABAQUS 建立了试验机机械系统的有限元模型, 对结构试验机进行了加载工况下静力分析和模态分析, 得到了结构试验机的固有频率和振型, 研究了机架加劲肋等因素对自振特性的影响, 本文研究工作可供结构试验机的设计和功能改造提供参考。

**关键词:** 试验机; 有限元模型; 模态分析

## 引言

北京工业大学现有的 4000 吨多功能结构加载系统的竖向主作动器吨位 4000 吨, 另有 400 吨水平作动器 1 套, 200 吨竖向作动器 2 套, 可实现大型构件的单压、压剪、压弯、压扭、弯扭试验, 该设备建成后已完成 500 余件的隔震橡胶垫、原型梁柱节点、偏心柱等试验, 为科研项目的顺利完成提供了强有力的支撑。

目前国内对于结构试验机机械系统受力分析主要手段是整体静力分析, 进行强度校核, 并对试验机的整体结构进行优化设计。

本文采用 ABAQUS 建立了加载系统的整体结构有限元模型, 进行强度校核, 并分析了加劲板对试验机振动特性的影响。4000kN 动载加载系统采用多组键牙、上横梁、导柱和键槽及钢地板形成的竖向力封闭机构, 可以进行无级调节, 从而实现行程内任意高度的试件加载。为了研究 4000 吨多功能结构加载系统在进行脆性试件加载时产生的环境振动问题, 本文通过 ABAQUS 模态分析得到了试验机的自振频率和振型。本文的研究工作是开展试验机减振技术研究的基础性工作。

## 1 有限元建模

### 1.1 几何模型

4000kN 动载加载系统的机架由 4 件大侧面反力支承架、大顶架、地面支承架、2 件小侧面反力支承架、小顶架、立柱、起升油缸固定支座以及筋板、勾头板等组成, 如图 1、2 所示

4000kN 动载加载系统采用多组键牙、上横梁、导柱和键槽及钢地板形成的竖向力封闭机构，可以进行无级调节，从而实现行程内任意高度的试件加载。为了研究 4000 吨多功能结构加载系统在进行脆性试件加载时产生的环境振动问题，本文建立了该试验机的有限元模型，通过 ABAQUS 模态分析得到了试验机的自振频率和振型。本文的研究工作是进行试验机减振技术研究的基础。

在建模的过程中，对试验机整体模型进行简化，忽略了键牙以及横梁上不会影响其整体强度和刚度的细节，如倒脚、圆孔等。各部件间的焊接、栓接假定为等强连接，其强度等于部件本身的强度<sup>[1]</sup>。图 3 为建立好的有限元模型。其中：1.基础，2.机架，3.下横梁，4.加载油缸，5.上横梁，6.顶架，7.键牙，8.试件。



图 1 系统立面图

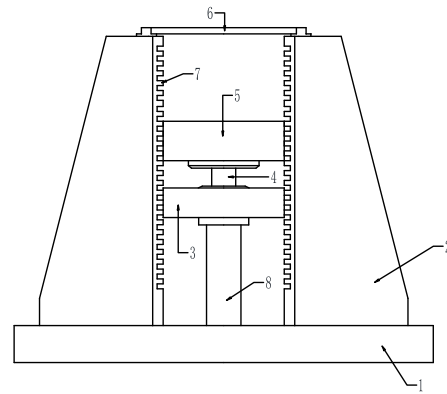


图 2 4000 吨加载系统示意图

## 1.2 单元类型定义及网格划分

除了键牙导向槽和导轨采用的是 30 号钢，其余均为 16Mn 钢<sup>[2]</sup>。试验机材料弹性模量  $E$  取 206GPa, 泊松比  $\nu$  取 0.3, 密度  $Q$  取 7850kg/m<sup>3</sup>。由于试验机结构较为复杂，采用自由网格划分的方式，采用精度较高的 10 节点修正的二次四面体单元 C3D10M 进行网格划分。网格的数量对分析计算的精度和规模大小有很大的影响。网格数量的增加会提高计算的精度，但也会增加计算的规模，因此整个模型中，对应力变化比较剧烈的地方增加网格密度，而受力较小的地方使用较少的网格<sup>[3]</sup>。节点数 71782，单元数 37345。图 4 为网格划分后的模型。

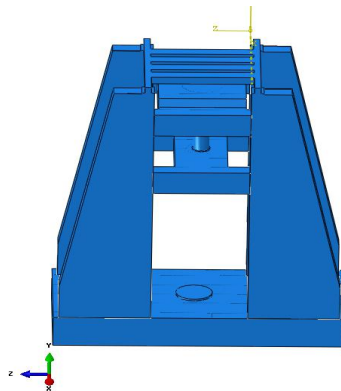


图 3 试验机几何模型

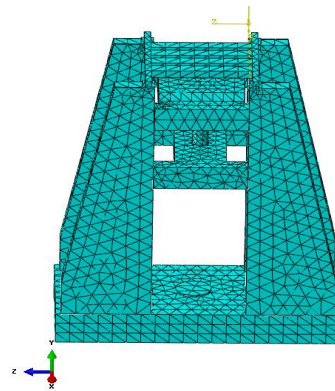


图 4 试验机有限元网格划分

## 1.3 边界条件处理

试验机机架通过地脚螺栓固定在地基上，有限元建模时对基础进行 X、Y、Z 三个平移自由度的约束，如果对某自由度不施加约束，无法得到的是结构的自振特性<sup>[4,5]</sup>。

## 1.4 求解器选择

检验有限元模型正确性的方法很多，在模型上施加静载进行静力分析是一种简单有效方法。静力计算后，我们可以根据有限元模型变形后的形状、最大挠度位置以及应力分布等计算结果对所建模型的正确性做初步的判断<sup>[6]</sup>。

试验机的静态分析并非为了求解试验机在工作状态下的应力、应变情况，而只能概况性的描述试验机的有限元模型在受到外力作用时的变形情况，进而对整机的有限元模型的正确性和协调性做出检验和评测<sup>[7]</sup>。在对试验机整机模型进行静态分析时，可以对模型施加虚拟载荷进行分析，观察相应的应力应变和变形情况，检查试验机有限元模型是否存在衔接上的缺陷和问题<sup>[8]</sup>。在本文的静力分析加载过程中，采取在下横梁底部，基础上表面施加一对 y 方向（竖直方向）上的面荷载。

ABAQUS/Standard 提供了 3 种特征值提取方法：Lanczos 方法、子空间迭代法和 AMS 方法。当模型的规模较大、复杂，且需要提取多阶振型时，Lanczos 方法的速度更快，因此采用 Lanczos 方法<sup>[9]</sup>。结构动态分析中各阶模态所占权重不同，权重因子与该阶频率成反比，频率越高，其权重越小，故少数低阶频率往往决定了结构动态性能，另外低阶频率段易与外界激励耦合发生共振，故低阶频率是模态分析的重点<sup>[10]</sup>。因此，确定提取结构的前四阶模态。

## 2 结果分析

### 2.1 静力分析结果

在进行大型试件单压试验时的受力情况，试验机整体受力可简化为下横梁受到一个整体向上的力，由于反作用试件将对基础有一个整体向下的力。本文采用面荷载施加方式<sup>[11]</sup>，假设试件截面积为  $1 \times 1\text{m}$ ，试件施加到下横梁及基础的荷载为  $40\text{MPa}$ 。

整体结构分析结果：

(1)整体结构的最大 Mises 应力出现在下横梁中部，为  $201.67\text{MPa}$ ，第一主应力为  $213.77\text{MPa}$ 。图 5、图 6 分别为结构受力后整体的 Mises 应力和第一主应力分布云图。

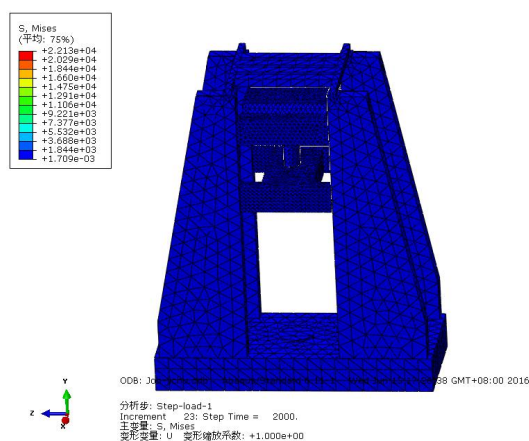


图 5 整体结构的 Mises 应力分布云图

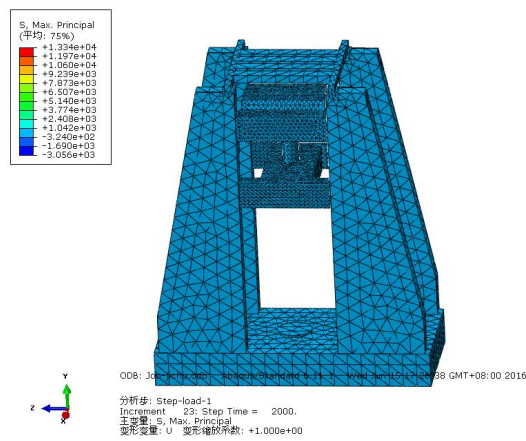


图 6 整体结构的第一主应力分布云图

从整机的应力分布云图可以看到，当对下横梁及基础施加竖直方向的载荷  $40000\text{kN}$  时，模型在各个方向上的变形情况符合实际情况，说明所建立的整机有限元模型是正确的。

(2)整体结构的最大变形发生在下横梁处，为  $5.48\text{mm}$ ，梁的最大跨度为  $5.455\text{m}$ ，相对挠度为  $1/1000$

图 7、图 8 分别为整体结构的变形位移分布云图和第一主应变位移分布云图

从整机静力分析变形图可以看到，整机结构的静力变形协调性较好。整机各构件没有出现过大的变形，各构件间的衔接紧凑，无衔接失效的现象。

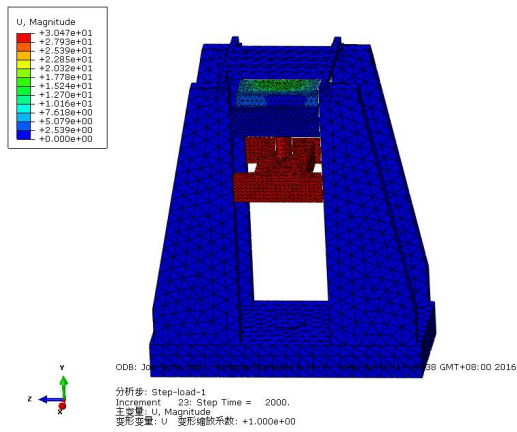


图 7 整体结构的变形位移分布云图

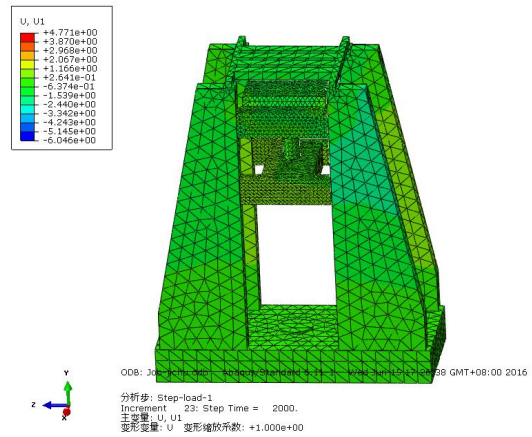


图 8 整体结构的第一主应变位移分布云图

## 2.2 模态分析

不添加加筋肋的固有频率如表格 1 所示。

表格 1 自振频率和振型

阶数	固有频率(Hz)	最大振幅 (mm)	振型特点
1	5.05	1.03	沿 X 方向发生剪切变形
2	16.77	1.26	沿 Y 轴发生扭转变形
3	17.47	1.04	沿 X 方向发生反向扭转变形
4	19.58	1.14	沿 X 方向发生交叉反方向弯曲变形

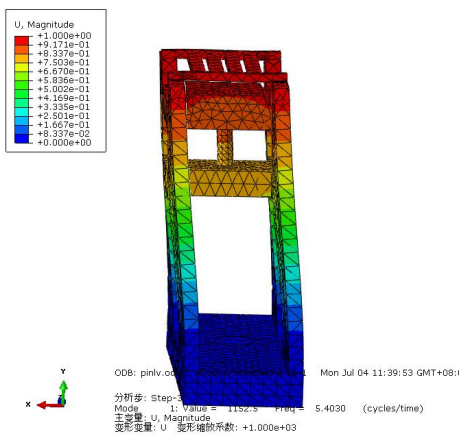


图 9 一阶振型位移云图

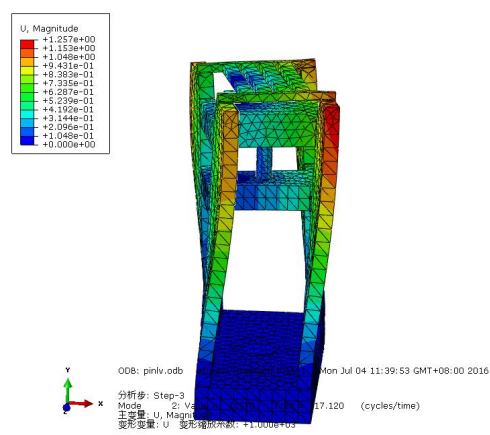


图 10 二阶振型位移云图

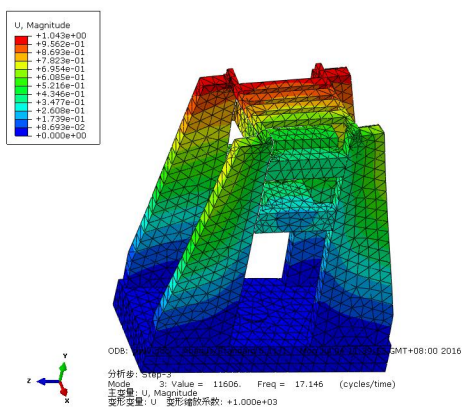


图 11 三阶振型位移云图

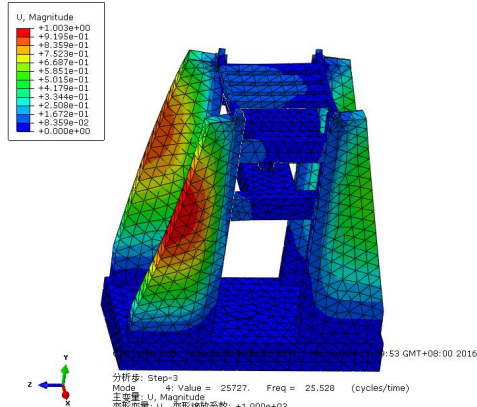


图 12 四阶振型位移云图



为了清楚的观察试验机各阶振型的振动情况，对结构变形进行放大，其中 X 为机架左右方向，Y 为机架前后方向，Z 轴为机架高度方向。

各阶振型图如图 9-12 所示。模态分析结果表明，整体主要振型是弯曲和扭曲，基于试验机构造要求，在机架、上横梁、下横梁添加沿 X 方向 40mm 厚的加劲板<sup>[12]</sup>，可以提高试验机的整体刚度。

2.3 加劲肋影响分析

添加加劲板对整体固有频率的影响如表格 2 所示

表格 2 添加加劲板对固有频率的影响			
阶次	固有频率/Hz		固有频率增加率/%
	无加劲板	有加劲板	
1	5.05	5.37	6.38
2	16.77	18.01	7.37
3	17.47	18.24	4.44
4	19.58	25.75	31.50

从计算出的加劲板对试验机整体的固有频率的影响来看，添加加劲板可以有效提高试验机的固有频率。

添加加劲板后的试验机模态频率最小频率最小值为一阶模态频率 5.37Hz，仍大于试验机液压加载系统的最大加载频率 0.5Hz，即无频率重合之处，因此机架结构的动态性能较好，避免了与加载系统产生共振的可能性，保证了试验机的工作质量且延长了工作寿命<sup>[13]</sup>。

3 参考文献

[1] Duan Z Y, Song B, Song G Y, et al. Modal Analysis of the Frame of YIJ Series Tire Uniformity Testing Machine[J]. Key Engineering Materials. 2013, 561: 201-205.

[2] 张娥. 特大型多功能结构试验加载系统的结构设计与分析[D]. 北京工业大学, 2005.

[3] 孙彩丽. 20 MN 快锻液压机设计及整体工作性能分析[D]. 燕山大学, 2007.

[4] 吕琳, 邓明, 李艳霞, 等. 基于有限元分析的精冲液压机机身结构优化[J]. 锻压技术. 2010(02): 102-106.

[5] 杨固川, 于江, 陈文, 等. 大型模锻液压机机架结构分析研究[J]. 锻压技术. 2010(03): 109-113.

[6] 吕强, 张学良, 陈永会, 等. 80MN 快锻液压机本体结构有限元分析[J]. 太原科技大学学报. 2015(04): 312-315.

[7] 杨秀萍, 宗升发, 曹晓邨. 液压机结构设计的有限元法[J]. 重型机械. 2003(06): 38-41.

[8] 曹哲贤, 郭兴森. 有限元分析的基本方法及工程应用[J]. 江西建材. 2015(08): 17-18.

[9] 何文斌, 曾攀, 林峰, 等. 40MN 钢丝缠绕多向模锻液压机机架有限元模态分析[J]. 锻压技术. 2011(02): 69-73.

[10] Pedrammehr S, Farrokhi H, Rajab A K S, et al. Modal Analysis of the Milling Machine Structure through FEM and Experimental Test[J]. Advanced Materials Research. 2011, 383-390: 6717-6721.

[11] 李超, 王素珍. 大型压力试验机结构有限元分析[J]. 工程与试验. 2011(S1): 31-33.

[12] Pedrammehr S, Farrokhi H, Rajab A K S, et al. Modal Analysis of the Milling Machine Structure through FEM and Experimental Test[J]. Advanced Materials Research. 2011, 383-390: 6717-6721.

[13] 杨成云, 林腾蛟, 李润方, 等. 增速箱系统固有特性和动态响应分析[J]. 中国机械工程. 2003(05): 26-28

4 结语

综上所述，采用 ABAQUS 对试验机进行了静力分析和模态分析，得出如下结论：

- (1) 工作状态下试验机整体受力分布比较均匀，应力小于材料屈服强度，满足使用要求。
- (2) 试验机的模态分析表明加劲板对试验机振动特性的影响较大，通过合理设置加劲肋可以有效的提高试验机的自振频率。

## REFERENCES

- [1] Duan Z Y, Song B, Song G Y, et al. Modal Analysis of the Frame of YIJ Series Tire Uniformity Testing Machine[J]. Key Engineering Materials. 2013, 561: 201-205.
- [2] ZHANG E. structural design and analysis of the oversize multifunctional structure test loading system[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005.
- [3] Sun C L.Design and Whole Work Performance Analysis of 20 MN Quick Forging Hydranic Press [D] .Qinhuangdao: Yanshan Uni-versitym2007
- [4] Lv Lin,Deng Ming,Li Yan Xia. Optimization of fine blanking machine 's frame based on finite element analysis[J]. Forging & Stamping Technology.2010(02): 102-106.
- [5] Yang Gu Chuang , Yu Jing,Chen Wen. Analytical research on large close-die forging press housing structure[J]. Forging & Stamping Technology. 2010(03): 109-113.
- [6] Lv Qiang,Zhang Xue Liang,Chen Yong Hui. Finite Element Analysis of 80 MN Rapid Forging Hydraulic Press. [J]. Ournal of Taiyuan University of Science and Technology. 2015(04): 312-315.
- [7] Yang Xiu Ping,Zong Sheng Fa,Cao Xiao Cun. Structural design of hydraulic press with finite element method [J]. Heavy Machinery. 2003(06): 38-41.
- [8] Cao Zhe Xian,Guo Xing Sen. The Basic Method of Finite Element Analysis and Its Engineering Application. [J]. Jiangxi Building Materials. 2015(08): 17-18.
- [9] He Wen Bin ,Zeng Pan,Lin Feng. Finite element modal analysis of steel wire wound frame for 40 MN multi-cored hydraulic press. [J]. Forging & Stamping Technology. 2011(02): 69-73
- [10] Pedrammehr S, Farrokhi H, Rajab A K S, et al. Modal Analysis of the Milling Machine Structure through FEM and Experimental Test[J]. Advanced Materials Research. 2011, 383-390: 6717-6721.
- [11] Li Chao,Wang Su Zhen. Finite Element Analysis on the Loading Frame of Large-type Compression Testing Machine. [J].Engineering & Test. 2011(S1): 31-33.
- [12] Pedrammehr S, Farrokhi H, Rajab A K S, et al. Modal Analysis of the Milling Machine Structure through FEM and Experimental Test[J]. Advanced Materials Research. 2011, 383-390: 6717-6721.
- [13] Yang Cheng Yun,Lin Teng Jiao,Li Run Fang. Normal Characterist is and Dynamic Response Analysis of Speed Increase Gearbox System[J].China Mechanical Engineering. 2003(05):26-28

### 【作者简介】



<sup>1</sup> 韩静（1990-），女，汉族，在读硕士，结构实验技术与振动控制，北京工业大学建筑与土木工程学院硕士研究生。Email:hanjing\_1129@163.com

<sup>2</sup> 纪金豹（1974-），男，汉族，博士，高级实验师，结构实验技术与振动控制。Email: jirboy@163.com

<sup>3</sup> 马玉彬（1986-），男，汉族，在读博士，结构实验技术与振动控制，北京工业大学建筑与土木工程学院博士研究生。Email:mcgrady501@126.com