

doi: 10.7690/bgzdh.2019.05.017

## 某车载高炮火力系统模态分析

吕俊珂<sup>1</sup>, 程广伟<sup>1</sup>, 苏林柏<sup>2</sup>, 王超<sup>3</sup>, 田亚锋<sup>1</sup>, 王华亭<sup>1</sup>

(1. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099; 2. 国防科技大学信息通信学院, 西安 710106;

3. 中国北方工业有限公司, 北京 100053)

**摘要:** 为避免在发射过程中高频射击工作载荷引起火炮结构剧烈振动, 提高车载高炮射击精度, 对某车载高炮火力系统模态分析进行研究。建立高炮火力系统结构拓扑关系和有限元分析模型, 采用 ANSYS Workbench 软件对其进行模态分析, 得到火力系统俯仰部分的固有频率和振型, 并通过模态试验对有限元模态计算结果进行验证。验证结果表明, 该研究可为车载高炮火力系统的动力学分析和结构优化设计提供依据。

**关键词:** 车载高炮; 火力系统; 模态分析; 模态试验;

**中图分类号:** TJ303 **文献标志码:** A

## Modal Analysis of Certain Type Trucked Anti-aircraft Gun Fire System

LYU Jiaoke<sup>1</sup>, Cheng Guangwei<sup>1</sup>, Su Linbo<sup>2</sup>, Wang Chao<sup>3</sup>, Tian Yafeng<sup>1</sup>, Wang Huating<sup>1</sup>

(1. Northwest Institute of Mechanical &amp; Electrical Engineering, Xi'an 712099, China;

2. Information &amp; Communication Institute, National University of Defense Technology, Xi'an 710106, China;

3. China North Industries Corporation, Beijing 100053, China)

**Abstract:** In order to avoid high frequency shooting load causes the trucked anti-aircraft gun's structure vibrates violently during the launch process and to improve the anti-aircraft gun's firing accuracy, research the modal analysis of trucked anti-aircraft gun fire system. Establish the structure topology and finite element analysis model of the anti-aircraft gun fire system, using the modal analysis in ANSYS Workbench software to obtain the fire system's natural frequency and vibration mode. The finite element modal calculation results are verified by modal test. Verification results show that this research can provide the reference for the dynamic analysis and structure optimization design of the anti-aircraft gun fire system.

**Keywords:** trucked anti-aircraft gun; fire system; modal analysis; modal test

### 0 引言

高炮火力系统的射击精度是高炮系统设计的一项重要性能指标。为保证实现该性能指标, 在高炮火力系统初步方案确立之后, 会开展火炮动力学特性分析和系统模态研究, 之后根据其研究结果再进行结构优化设计等工作。

芮筱亭<sup>[1]</sup>在对某舰炮进行研究时, 建立了刚柔耦合多体系统动力学模型, 通过多体系统传递矩阵法的计算求解, 得到该舰炮的振动特性, 与模态实验进行对比, 证明其正确性。蔡文勇<sup>[2]</sup>建立了某大口径车载炮的多柔体动力学模型, 对其动态特性进行了分析研究, 并对总体结构参数进行优化, 优化后结果表明, 炮口扰动明显减小。汪国梁等<sup>[3]</sup>采用 ABAQUS 软件建立某多管火箭炮动力学模型, 通过模态分析计算得到火箭炮主要部件和全炮的动态特性, 用正交实验法得到对初始扰动贡献最大的部件。徐立黄等<sup>[4]</sup>用 ANSYS 有限元软件建立某多管火箭

炮模型并计算得到固有频率和振型, 为某多管火箭炮的优化设计提供参考。

笔者结合某中口径车载高炮的研制, 以该车载高炮火力系统为研究对象, 建立高炮火力系统结构拓扑关系和有限元分析模型, 用 ANSYS Workbench 软件对其进行模态分析, 得到火力系统俯仰部分的固有频率和振型, 并通过模态试验对有限元模态计算结果进行验证, 为该车载高炮火力系统的动力学分析和结构优化设计提供了依据。

### 1 有限元模型建立

#### 1.1 几何模型建立

某车载高炮火力系统由炮身、炮闩、复进机、反后坐装置、装填机、颈筒、摇架、左右托架、方向机、高低机、平衡机、炮架和座圈等组成。其中: 炮身通过复进机和反后坐装置安装在颈筒和摇架上, 可沿炮膛轴线作复进和后坐运动, 炮闩和装填

收稿日期: 2019-01-08; 修回日期: 2019-03-20

作者简介: 吕俊珂(1990—), 女, 陕西人, 硕士, 助理工程师, 从事火炮设计研究。

机也安装在摇架上，一起构成火力系统俯仰部分，并通过摇架上的耳轴孔与左右托架上的耳轴孔相连接；左右托架、方向机、高低机、平衡机安装在炮架上，高低机的主齿轮与固连在摇架上齿弧相啮合，方向机的主齿轮与安装在炮架下方的座圈齿圈相啮合。平衡机连接火力系统俯仰部分和炮架，以平衡火力系统俯仰部分的重力矩，使火力系统在任意射角处于平衡状态。

依据该高炮火力系统结构和工作原理，简化的火力系统拓扑结构见图 1。其中  $h^r$  和  $h^l$  分别表示转动副和移动副。

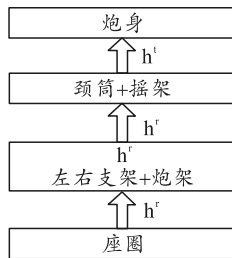


图 1 火力系统拓扑结构

为保证有限元法在划分网格时的质量要求和求解效率，在保证模型结构的主要力学特征前提下，尽量简化几何模型。简化后的火力系统主要由炮身、颈筒、摇架、左右托架、座圈和炮架组成。其中，安装在炮身上的炮口装置，将其简化为集中质量点加载到炮口位置；其余如炮闩、复进机、反后坐装置、方向机、高低机、平衡机等，根据其安装和工作特点，做相应处理，保持火力系统几何模型系统质心不变。

火力系统的简化后的几何模型如图 2 所示。

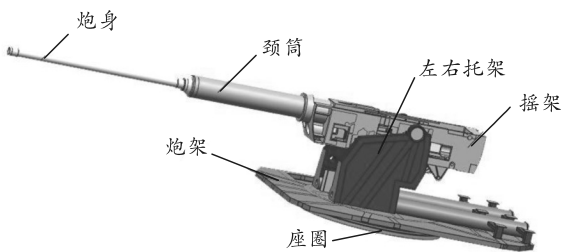


图 2 火力系统几何模型

### 1.2 有限元模型网格划分

该车载高炮火力系统部件几何结构各异，难以用统一单元进行划分，故采用混合单元来对网格进行划分。炮身和颈筒采用六面体单元，摇架、左右托架、座圈和炮架采用四面体单元。根据各部件大小选取单元尺寸，经反复试算和优化，炮身和颈筒网格单元大小为 15 mm，摇架、左右托架、座圈和炮架网格大小为 20 mm，点击 Generate Mesh 进行

网格划分，并对网格的质量进行检查。

火力系统网格划分如图 3 所示。

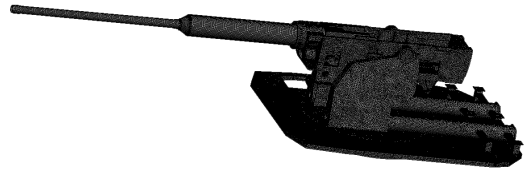


图 3 有限元网格划分模型

### 1.3 载荷约束处理

根据图 1 的火力系统拓扑结构，在自重情况下，对其有限元模型座圈底端施加零位移约束 (fixed support)，对高低齿弧啮合处施加圆柱面约束 (cylindrical support)，0°射角工况下，约束位置在高低齿弧 39°处相切。由于炮身、颈筒和摇架在非工作状况下，相互之间无相对运动，所以在炮身和颈筒、摇架之间施加固定约束。

## 2 模态分析

一般反映结构工作时动态特性的通常是前 10 阶模态，考虑为计算结果留有一定的余量，笔者提取车载高炮火力系统的前 12 阶模态，模态计算结果见表 1。由于有些阶模态集中表现为局部弯曲振动，这里只列出部分感兴趣的振型如图 4 所示。

表 1 火力系统模态计算结果 Hz

| 阶次 | 固有频率     | 阶次 | 固有频率     |
|----|----------|----|----------|
| 1  | 4.651 8  | 7  | 46.294 0 |
| 2  | 7.784 7  | 8  | 47.043 0 |
| 3  | 14.531 0 | 9  | 53.281 0 |
| 4  | 17.538 0 | 10 | 53.609 0 |
| 5  | 44.300 0 | 11 | 68.261 0 |
| 6  | 44.425 0 | 12 | 76.859 0 |

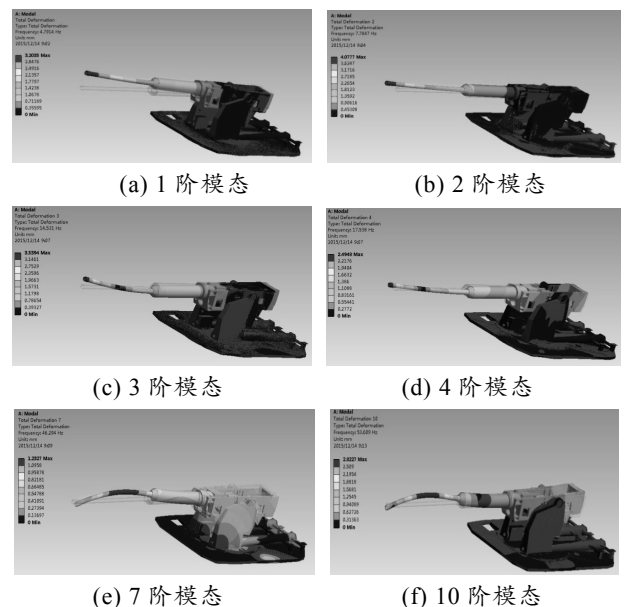


图 4 火力系统模态分析部分振型

由表可以看出：该车载高炮火力系统的前 12 阶固有频率在 4.651 8~76.859 Hz，振型为纵、横交错有规律的振动，炮身主要产生弯曲变形(为了显示直观明了，图片变形均放大处理)。在火力系统 1~12 阶的振型图中，1 阶振型主要为炮身的纵向振动，2 阶振型主要为炮身的横向振动。3 阶和 4 阶振型，炮身和摇架一起发生纵向或横向振动，但主要以炮身的振动为主。在 7 阶和 8 阶振型时，炮身、摇架和托架一起发生纵向或横向振动，但主要还是以炮身的振动为主。9 阶和 10 阶振型则主要为炮身和摇架的扭转或俯仰振动。5 阶、6 阶、11 阶和 12 阶振型均为在炮架板上的局部弯曲振动，故这些振型的图片不再采集。

模态计算结果表明：该车载高炮火力系统的各阶固有频率很好地避开了工作载荷频率(2 Hz)，动态特性较好。

### 3 模态试验

#### 3.1 试验目的

模态试验的目的：一是为了获取实际火力系统的动态特性参数，根据这些参数对系统的动态特性进行分析研究，优化火力系统的结构，改善系统的动态特性；二是验证有限元模态计算结果的准确性，为有限元模型的修正提供直接依据，使计算机模型更趋于完善和合理。

#### 3.2 测试软件及相关硬件简介

本次试验中用到的主要设备有：美国迪飞公司的 DP730 振动测量仪、力锤、传感器和笔记本电脑 1 台。试验测量使用的软件为 SignalCalc 730，试验数据处理使用的软件为 ME'scopeVES。

#### 3.3 模态试验步骤

1) 选择测试点和激励点位置。选取该车载高炮摇架前端与颈筒连接处顶点位置为激励点。此处为该车载高炮火力系统上比较刚硬部位，敲击时可避免产生局部变形。

2) 仪器连接。连接好各设备，电源接通后，检查导线是否接通，仪器是否工作正常，直到出现的波形是正确的。

3) 数据采样。数据采样的标准是：能够表明力锤没有连续进行敲击，信号没有过载。

4) 模态分析。软件会自动创建该车载高炮火力系统模型，输入模型的各参数，对设置传感器的位置进行节点坐标的编辑，编写测点号如图 5 所示。

从试验得到数据，将每个测试点的频响函数数据读入模态分析软件中。

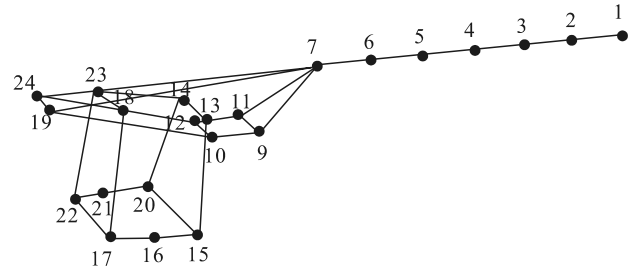


图 5 发射系统测试点分布

5) 振型编辑。模态分析完成以后可以观察模态振型的动画显示

6) 动画显示。在软件窗口中可以观察模型的振动情况，可以改变速度大小以及几何位置。

### 3.4 模态试验结果

经过模态试验各步骤采集得到试验数据，给出了火力系统的固有频率及部分模态振型，高阶模态多为局部模态，根据试验结果，给出了 60 Hz 以下的模态参数见表 2。

表 2 火力系统模态试验结果 Hz

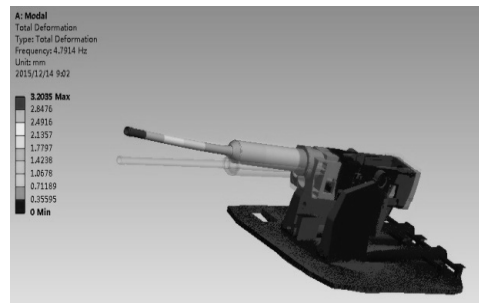
| 阶次 | 固有频率  | 阶次 | 固有频率  |
|----|-------|----|-------|
| 1  | 5.00  | 6  | 47.50 |
| 2  | 6.25  | 7  | 48.70 |
| 3  | 15.20 | 8  | 54.50 |
| 4  | 17.50 | 9  | 56.70 |

### 4 模态试验与模态分析结果

由于振型图较多，高阶模态多为局部模态，下面结合系统 1、2 和 3 阶模态振型图对比有限元模态计算结果做详细说明。表 3 为火力系统模态试验与有限元计算结果对比。有限元计算 1 阶、2 阶、3 阶振型与试验对比分别如图 6—图 8 所示。

表 3 火力系统模态试验与有限元计算结果对比 Hz

| 类型        | 阶次      |         |          | 振型 |    |    |
|-----------|---------|---------|----------|----|----|----|
|           | 1       | 2       | 3        | 1  | 2  | 3  |
| 模态试验固有频率  | 5.00    | 6.25    | 15.20    | 纵向 | 横向 | 纵向 |
| 有限元计算固有频率 | 4.651 8 | 7.784 7 | 14.531 0 | 弯曲 | 弯曲 | 弯曲 |



(a) 有限元计算 1 阶振型

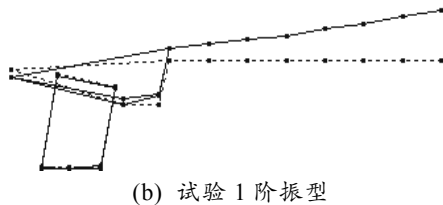


图 6 有限元计算 1 阶振型与试验对比

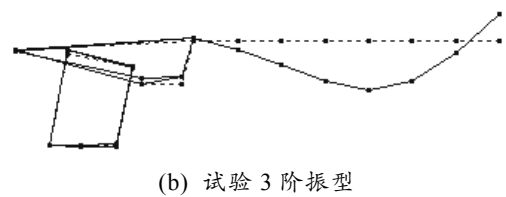
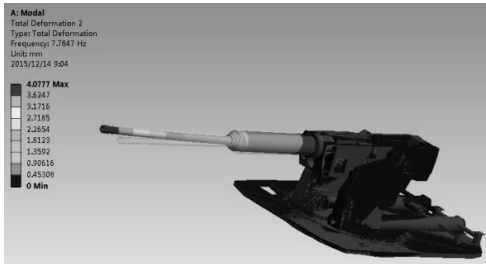


图 8 有限元计算 3 阶振型与试验对比



(a) 有限元计算 2 阶振型



(b) 试验 2 阶振型

图 7 有限元计算 2 阶振型与试验对比



(a) 有限元计算 3 阶振型

对比模态分析计算得到的和试验得到的火力系统的模态参数及部分模态振型可以看出：固有频率偏差在偏差范围之内，各阶振型一致，火力系统的动态特性良好<sup>[6]</sup>。

### 5 结束语

有限元模态计算方法是火炮动力学特性研究主要途径，笔者根据某车载高炮火力系统特点，建立了火力系统拓扑结构和有限元模态分析模型，用 ANSYS Workbench 软件对其进行模态分析，得到各阶固有频率和振型，并通过模态试验对其计算结果进行验证。应用该方法，可快速发现结构振动的缺点，对火炮结构优化设计有着重要意义。

### 参考文献：

- [1] 芮筱亭. 舰炮振动分析的多体系统有限元传递矩阵法[J]. 兵工学报, 2007, 28(9): 1036-1040.
- [2] 蔡文勇. 大口径车载火炮多柔体动力学与总体优化研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [3] 汪国梁, 李志刚, 魏浩. 某多管火箭炮固有频率匹配研究[J]. 兵工自动化, 2014, 33(12): 18-21.
- [4] 徐立黄, 张贵林, 张波涛, 等. 基于有限元的某多管火箭炮模态分析[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(6): 110-115.
- [5] 谈乐斌, 张相炎, 管红根, 等. 火炮概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003.
- [6] 史海龙, 王晶晶, 李文才, 等. 基于误差投影的着发射击高炮毁歼概率计算方法[J]. 兵工自动化, 2018, 37(9): 37-41.