

doi: 10.7690/bgzd.2019.03.015

某车载速射迫击炮上架有限元模态分析

胡 涛, 王瑞林, 张军挪

(陆军工程大学石家庄校区火炮工程系, 石家庄 050003)

摘要: 为验证某型车载速射迫击炮上架设计的合理性, 利用 Abaqus 有限元软件, 对车载速射迫击炮上架有限元模态进行分析。采用等效质量的方法, 在 Solidworks 中建立上架 3 维模型, 通过对上架及自动机和高低机的装配体结构进行有限元模态分析, 计算出其前 20 阶的固有频率和振型。研究表明: 该设计是合理的, 能避开迫击炮的射击频率, 可为上架的进一步结构优化及武器试验基地的射击试验提供参考。

关键词: 速射迫击炮; 上架; 有限元法; 模态分析; Abaqus

中图分类号: TJ31 **文献标志码:** A

Finite Element Modal Analysis of Certain Type Vehicle-mounted Rapid-fire Mortar's Gun Upper Frame

Hu Tao, Wang Ruilin, Zhang Junnuo

(Department of Artillery Engineering, Shijiazhuang Campus of PLA University of Army Engineering, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to verify the rationality of the design of certain type vehicle-borne rapid-fire mortar, the Abaqus finite element software was used to analyze the finite element mode of the vehicle-mounted rapid-fire mortar. Using the method of equivalent mass, a 3-D model was built in Solidworks. The finite element model analysis of the assembly structure of the upper frame, the automaton, the high and low machine, and the first 20 order natural frequencies and vibration modes were got. The research results show that this design is reasonable and can avoid the firing frequency of mortars. It can provide reference for the further structural optimization of the upper frame and the firing test of the weapon test base.

Keywords: rapid-fire mortar; upper frame; finite element method; modal analysis; Abaqus

0 引言

一直以来, 炮架作为火炮承受后坐力和支撑火炮的关键部件而得到重点关注和研究^[1], 尤其是其结构强度和模态。射击的频率必须要避开其固有频率, 否则一旦产生共振, 不仅影响射击精度, 甚至可能导致火炮损坏, 发生危险事故。笔者对某型车载速射迫击炮上架的动态特性进行研究, 主要分析其固有频率。对于复杂结构的动态特性分析, 有采用整体模型合并为一体^[2-4]的方法, 或采用将其分成若干子结构^[5]的方法, 以及采用整体装配然后在适当位置施加点质量^[6]的方法。笔者采用等效质量的方法, 模拟了各部件的真实装配关系, 使模型更接近于实际情况。

目前, 国际上通用的有限元分析软件主要包括 Abaqus、ANSYS、NASTRAN、ADINA、I-DEAS 等。Abaqus 以其友好的操作界面深受工程应用者的欢迎, 其强大的连接和装配约束库可以很方便地根据实际情况模拟各部件之间的关系。笔者采用

Abaqus 有限元分析软件对速射迫击炮上架进行有限元模态分析, 求解其固有模态和固有振型, 为后续的上架结构优化和强度分析提供参考依据。

1 模态分析理论

没有外载荷作用, 结构在初始扰动作用下的振动称为结构的自由振动。无阻尼系统的自由振动频率称为结构的固有振动频率, 相应的振型称为结构的固有振型^[7]。如果知道了结构的固有频率, 便可以在设计与改进时使结构的固有频率避开其在使用过程中的外部激振频率。另外, 通过对模态振型的分析, 还可以了解结构弯曲刚度和扭转刚度的分布情况^[6]。

在不考虑阻尼的情况下, 结构在初始扰动作用下, 按照图 1 的简谐运动一直进行, 在机械系统结构动力方程中:

$$\{M\}\{\ddot{d}\} + \{C\}\{\dot{d}\} + \{K\}\{d\} = \{R\}。 \quad (1)$$

令式中的 $\{C\}=0$ 、 $\{R\}=0$, 即可得到系统的无阻

收稿日期: 2018-11-03; 修回日期: 2018-12-14

作者简介: 胡 涛(1993—), 男, 湖北人, 硕士, 从事武器系统动力学仿真研究。

尼自由振动的动力方程：

$$\{M\}\{\ddot{d}\} + \{K\}\{d\} = 0. \quad (2)$$

式中： $\{M\}$ 为系统的质量矩阵； $\{d\}$ 为系统的位移矩阵； $\{C\}$ 为系统的阻尼矩阵； $\{\ddot{d}\}$ 、 $\{\dot{d}\}$ 为系统的加速度矩阵、速度矩阵； $\{R\}$ 为系统的载荷矩阵； $\{d\}$ 和 $\{R\}$ 是 $n \times 1$ 阶的列阵。

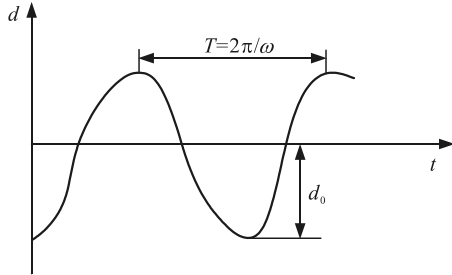


图 1 周期振动响应

在无阻尼周期振动响应中，各节点均为简谐运动，节点位移可设为

$$\{d\} = \{d_0\} \cos \omega t. \quad (3)$$

式中： $\{d_0\}$ 是节点的振幅列阵，即振型； ω 是该振型对应的自然频率； t 是时间。

将式(3)代入式(2)中，得到齐次方程：

$$(\{K\} - \omega^2 \{M\})\{d_0\} = 0. \quad (4)$$

该方程具有非零解的条件是其系数行列式等于零，即

$$|\{K\} - \omega^2 \{M\}| = 0. \quad (5)$$

上式为系统的特征方程。由于 $\{K\}$ 和 $\{M\}$ 均为 n 阶方阵(n 为系统的自由度)，故特征方程是关于 ω^2 的 n 次代数方程，其根即为系统固有频率的平方根，然后将系统的固有频率代入式(4)，可求得系统的幅值矩阵 $\{d_0\}$ ，即系统的振型。

2 有限元模型的建立

2.1 模型的建立与网格划分

由于该迫击炮上架本体结构较为复杂，而有限元软件 3 维建模功能较弱；因此，首先在大型 3 维软件 Solidworks 中建立上架 3 维模型的装配体。建模过程中，把一些倒角和小孔等对模态分析结果影响不大，但会增加网格划分的难度甚至导致网格划分失败的细节被清理掉，形成一个相对简洁的模型，然后将模型保存为 Parasolid 文件。因为上架的主体部分为焊接结构，因此在导入有限元软件 Abaqus 中的时候，可以将上架以部件的形式导入，形成一个整体的部件，以大大减少在 Abaqus 中进行装配

的工作量。而自动机和高低机可以在 Abaqus 中分别建立与其质量等效的部件来模拟，然后在 Abaqus 中只需将自动机和高低机与上架进行装配即可。该上架简化后的模型包括左、右侧板，高低机支座，左、右耳轴台，定位块，筋板，下板，角钢支座，左、右平衡机支座，调整垫片，梳轮连接筋，左、右梳轮。由于构件形状较复杂，故所有构件均采用 4 节点四面体单元(C3D4)。上架的 3 维实体模型和有限元模型如图 2、图 3 所示。

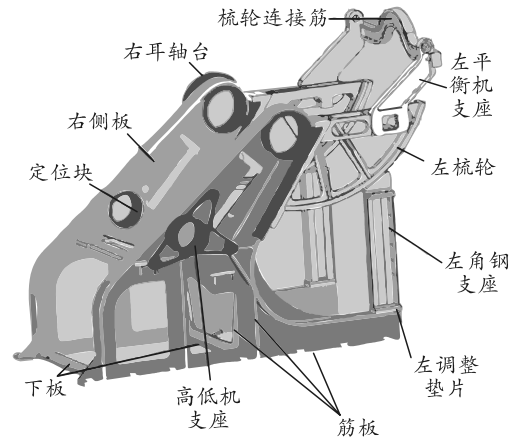


图 2 上架实体模型

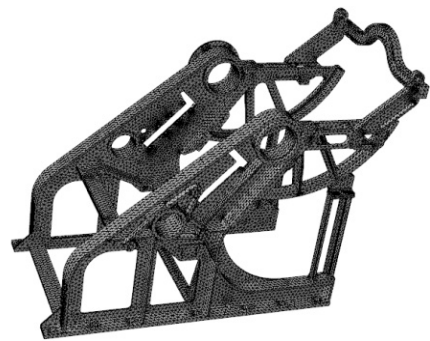


图 3 上架有限元模型

2.2 装配体的定义

在该上架中，左、右侧板和下板以及筋板、耳轴台是焊接在一起的，可以当成一个部件。高低机支座、定位块是通过螺栓固定在侧板上的，梳轮与筋板、角钢支座、平衡机支座，调整垫片与角钢支座、筋板，梳轮连接筋与平衡机支座均是通过螺栓连接在一起的，在 Abaqus 模态分析中可以使用多点约束(MPC)中的梁单元模拟螺栓连接^[8]。自动机和高低机分别通过 2 个等效质量的部件来模拟，并且和上架采用接触来定义装配关系如图 4。其中，自动机和高低机的密度利用它们的质量和在上架中建立等效部件的体积来计算，保证自动机和高低机的质量与实际质量一致，从而更加接近真

实情况。

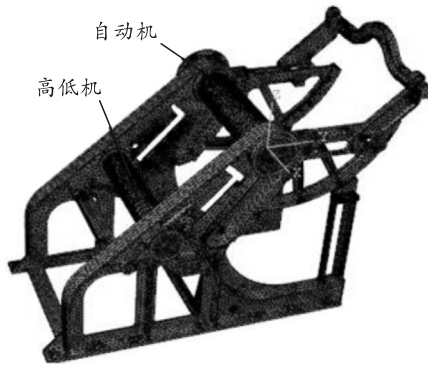


图 4 装配体有限元模型

2.3 材料属性的定义

进行模态分析时，材料必须为线性材料，且必须定义材料的弹性模量、泊松比和密度。该上架材料为 45 钢，自动机和高低机的等效密度通过计算得出，具体参数见表 1。

表 1 材料参数

部件	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m ³)
上架本体	206	0.27	7 800
自动机	206	0.27	151 000
高低机	206	0.27	7 200

2.4 边界条件

在模态分析时，只需要定义边界条件，而且唯一有效的边界条件是零位移约束，其他所有载荷在模态分析时都将会被忽略。该上架的左右两边底部通过 14 个螺栓与旋转基座连接在一起，因此，约束这 14 个螺栓孔表面的 6 个自由度来模拟上架的实际约束状态。

3 模态计算与结果分析

3.1 模态计算

系统的模态只与系统的质量、转动惯量、刚度、边界条件等有关，而与外加载荷没有关系。只要边界条件确定，则模态主要取决于系统的惯性与弹性。如果求出了系统的固有模态，则系统在任意载荷作用下的响应均可通过振型叠加法求解出来，这也是模态计算很受关注的原因之一。由机械振动理论可知：系统的低阶模态对振动响应的影响较大，而高阶模态由于能量大则可忽略不计^[9]；因此，只需计算较低阶次的模态。有限元软件 Abaqus 提供了 3 种求解模态的方法：兰索斯法(Lanczos)、子结构法(AMS)、子空间法(Subspace)。它们各有优劣，使用时需根据实际情况选择。当模型较大，计算的模

态较多时，兰索斯法更快，但消耗内存较大；当计算的模态较少时，子空间法的计算速度会更快；当模型很大，求解模态很多，并且需要求解基于模态分析的问题时，子结构法效果最好。笔者计算上架的前 20 阶模态，采用兰索斯法。

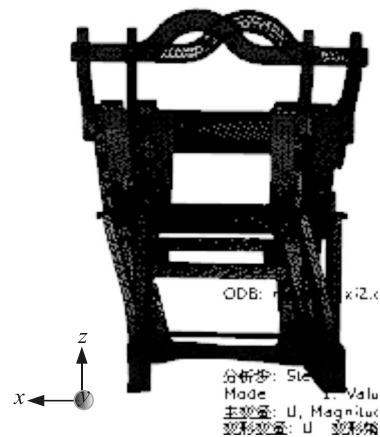
3.2 结果分析

该上架的前 20 阶固有频率和振型描述见表 2，前 6 阶模态的振型如图 5。

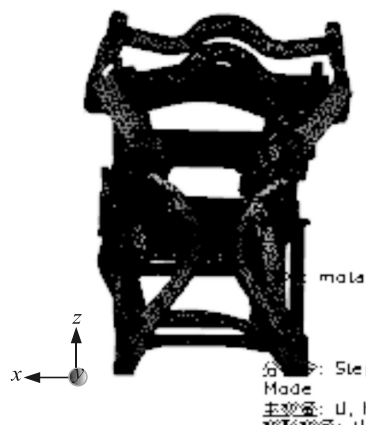
表 2 上架的前 20 阶固有频率

模态阶次	固有频率 f /Hz	振型描述
1	26.465	绕 Y 轴扭转
2	86.798	绕 X 轴扭转
3	113.32	绕 Y 轴扭转
4	161.27	绕 Y 轴扭转
5	193.41	绕 Y 轴扭转
6	198.71	绕 Y 轴扭转
7	205.88	绕 Y 轴扭转
8	294.28	绕 X 轴扭转
9	294.92	绕 Z 轴扭转
10	299.27	绕 Y 轴扭转
11	327.33	绕 Y 轴扭转
12	387.52	绕 Y 轴扭转
13	521.13	绕 Z 轴扭转
14	534.21	绕 X 轴扭转
15	551.09	绕 Y 轴扭转
16	570.13	绕 Y 轴扭转
17	605.04	绕 Y 轴扭转
18	674.73	绕 Y 轴扭转
19	676.32	绕 Z 轴扭转
20	681.59	绕 Z 轴扭转

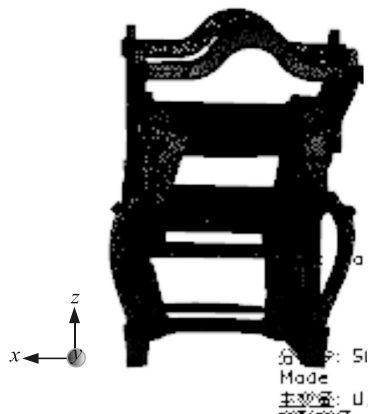
由表可以看出，该上架主要的振型为绕 X、Y、Z 轴的扭转。其中，绕 Y 轴的扭转最主要，而且前 6 阶振型除了第 2 阶外，均是绕 Y 轴扭转。从图 5 可以看出，上架后部的梳轮连接筋、平衡机支座和角钢支座变形较大。上架底部、角钢支座中间部位和平衡机支座与梳轮连接的部位是强度校核关注的重点位置，另外，该迫击炮连发时的射速为 4 发/1.5 s，即射击频率为 2.667 Hz，而上架的最低频率为 26.465 Hz；因此，上架的设计完全避开了该迫击炮的射击频率，正常情况下射击不会产生共振。



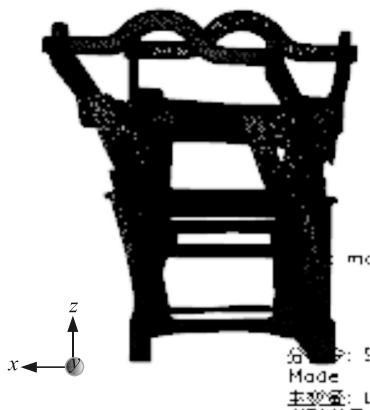
(a) 第 1 阶振型



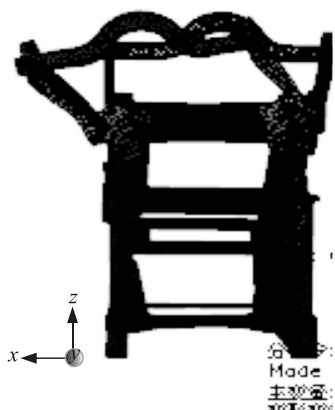
(b) 第 2 阶振型



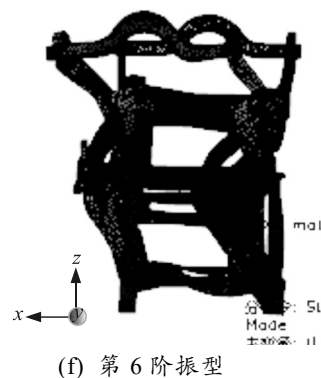
(c) 第 3 阶振型



(d) 第 4 阶振型



(e) 第 5 阶振型



(f) 第 6 阶振型

图 5 上架前 6 阶固有振型

4 结束语

1) 笔者基于上架的 3 维实体模型建立了有限元模型, 较实际地定义了各部件之间的接触, 利用等效质量的部件模拟了自动机及高低机的实际安装位置和质量对上架模态的影响, 使上架模态计算结果更加接近真实值。

2) 通过有限元软件, 采用兰索斯法计算出上架的前 20 阶固有频率, 得到其固有振型, 并对其结果进行了分析, 证明了该上架设计的合理性, 为基地的射击试验提供了参考。

3) 根据其固有振型图可以直观地分析上架的动力学特性, 找出上架的薄弱位置, 为后续的结构优化提供参考依据。

参考文献:

- [1] 申亮. 某舰炮发射动力学仿真分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [2] 蔡宣明, 王俊元, 马维金. 重型汽车变速箱箱体有限元模态分析[J]. 机械设计与制造, 2011(1): 22-24.
- [3] 李青林, 陈翠英, 马成祺. 4LYZ-2 油菜收割机台框架有限元模态分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 54-56.
- [4] 梁尚明, 罗伟, 徐俊, 等. 摆动活齿轮减速器系统有限元模态分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(2): 77-80.
- [5] 李小雷, 崔志琴, 苏铁熊, 等. 大功率柴油机复杂组合结构的有限元模态分析[J]. 内燃机工程, 2002, 23(1): 16-18.
- [6] 化斌斌, 马吉胜, 吴大林. 某型舰炮炮架本体有限元模态分析[J]. 科技通报, 2012, 28(11): 161-164.
- [7] 胡于进, 王璋奇. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 195.
- [8] 张芳添, 谈乐斌, 倪梯闵, 等. 某火炮筒紧身管设计及有限元分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(11): 12-14.
- [9] 杨成云, 林腾蛟, 李润方, 等. 中心传动齿轮箱体固有特性研究[J]. 机械设计与制造工程, 2002, 31(4): 26-27.