

doi: 10.7690/bgzdh.2014.12.006

## 某多管火箭炮固有频率匹配研究

汪国梁, 李志刚, 魏浩

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 为减小火箭炮起始扰动, 以有限元理论为基础, 采用 ABAQUS 软件建立某多管火箭炮动力学模型。通过模态分析计算获得火箭炮各主要部件和全炮的动态特性, 采用发射动力学分析得到定向管口初始扰动的相关参数, 利用快速傅里叶变换得到对初始扰动影响最大的频率, 并利用正交实验法, 以固有频率为实验目标, 确定对初始扰动贡献最大的部件。研究表明: 该模型能有目的地优化部件, 减小起始扰动, 有一定的参考价值。

**关键词:** 初始扰动; 模态; 发射动力学; 快速傅里叶变换; 正交实验法

**中图分类号:** TJ393 **文献标志码:** A

## Study on the Match of Natural Frequency for Certain Type Multi-Tube Rocket Launcher

Wang Guoliang, Li Zhigang, Wei Hao

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** For reducing rocket launcher initial disturbance, based on finite element theory, use ABAQUS software to establish certain type multi-tube rocket launcher dynamic model. Through mode analysis calculation, acquire dynamic features of main component and rocket launcher. Use launch dynamic analysis to acquire related parameters of orientation tube initial disturbance, use FFT to acquire frequency which has max influence on initial disturbance. Adopt orthogonal experiment method, taking natural frequency as experiment target, to determine the component which has greatest contribution to reduce initial disturbance. The experiment results show that the model can optimize component, reduce initial disturbance and has reference value.

**Keywords:** initial disturbance; mode; launch dynamics; FFT; orthogonal experiment method

### 0 引言

火箭炮发射时承受的是一种作用时间极短的冲击载荷, 使发射系统产生强非线性(几何非线性、边界非线性)的动态响应, 由此造成定向管的剧烈振动。火箭弹离开定向器管口时, 定向管的振动会引起火箭弹的起始扰动, 使火箭炮射击精度降低。火箭炮发射时的振动涉及到火箭炮各部件的模态和耦合效应, 若部件的固有频率不合理, 会造成部件之间较大的耦合, 导致起始扰动变大, 射击密集度降低。笔者采用 ABAQUS 软件建立某多管火箭炮动力学模型, 创新性地将模态分析与正交实验法结合, 找出对初始扰动影响最大的部件, 以有目的地优化部件, 减小起始扰动。

### 1 火箭炮的动力学模型及模态分析

#### 1.1 火箭炮的动力学模型

某多管火箭炮是一个极其复杂的系统, 为体现出全炮的系统特性, 建立合适的动力学模型, 自下而上将全炮简化为车体、底座、回转机、起落架、储运箱、定向器和火箭弹等<sup>[1]</sup>。火箭炮采用半刚性

支撑, 车体和千斤顶与地面的连接用非线性弹簧阻尼器模拟, 车体与底座之间、起落架与储运箱之间、储运箱与定向器之间、定向器与火箭弹之间均用固定副连接, 回转体与底座之间采用旋转幅连接, 同时通过方向齿轮啮合限制其旋转自由度, 回转机与起落架采用旋转幅连接, 同时通过高低齿弧与高低机齿轮啮合限制其俯仰自由度。ABAQUS 中建立的某多管火箭炮动力学模型如图 1 所示。火箭炮模型载荷的施加: 闭锁力为 7 000 N, 火箭弹推力数据由实验测得, 按照二次曲线拟合方法得到样条曲线函数通过集中力作用于火箭弹的尾部。燃气射流力由气体动力学软件仿真获得。

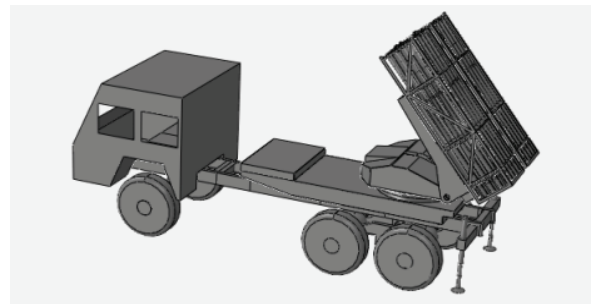


图 1 火箭炮动力学模型

收稿日期: 2014-06-22; 修回日期: 2014-08-13

作者简介: 汪国梁(1990—), 男, 安徽人, 硕士, 从事火箭系统发射动力学研究。

### 1.2 火箭炮的模态分析

模态分析是研究结构动力特性的一种近代方法，是系统辨别方法在工程振动领域中的应用<sup>[2]</sup>。通过模态分析可以得到结构在给定约束条件下的固有频率和振型等参数。根据这些参数，就可以对结构在实际工况的振动以及各部件间耦合情况进行推断，指导结构的设计，并且可以对现有结构进行故障诊断和减振降噪。

火箭炮各部件根据连接关系成为一个整体，在发射过程中，在火箭弹燃气射流冲击作用下，全炮作为一个系统产生振动，所以对全炮进行模态分析是十分必要的。通过全炮模态计算可以得到整个发射装置的动态特性。根据前面建立的火箭炮模型，进行模态计算，并提取前 12 阶固有频率，如表 1 所示。图 2~图 5 为具有代表性的几阶振型。

表 1 全炮模态计算结果 Hz

阶次	固有频率	阶次	固有频率	阶次	固有频率
1	1.01	5	7.67	9	26.90
2	2.67	6	10.10	10	30.30
3	3.87	7	15.10	11	30.70
4	5.87	8	20.30	12	34.30

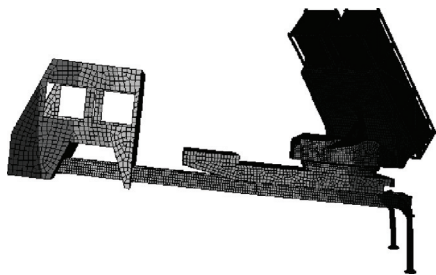


图 2 第 1 阶振型

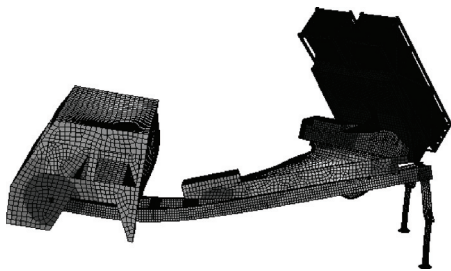


图 3 第 5 阶振型

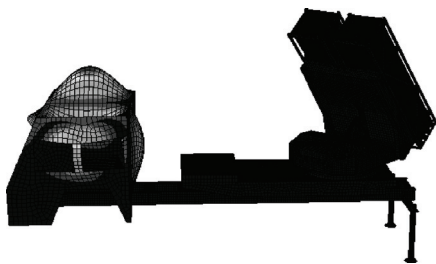


图 4 第 9 阶振型

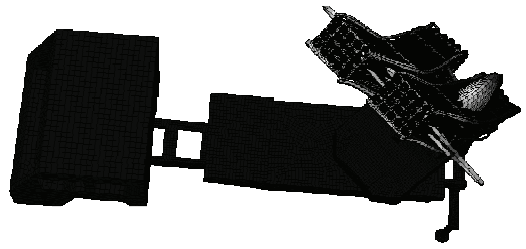


图 5 第 12 阶振型

### 2 火箭炮发射动力学计算及 FFT 变换

通过试验、分析，已找到提高火箭射击精度的措施。对于火箭发射装置而言，减小初始扰动是一个重要手段<sup>[3]</sup>。通过仿真分析，得到振动时域上的曲线，为找寻对振动贡献最大的频率做准备。由以上建立的动力学模型，计算工况如下：高低射角为 50°，方向射角为 45°。对 1 枚火箭弹发射过程进行仿真，结果定向管口振动曲线如图 6、图 7 所示。

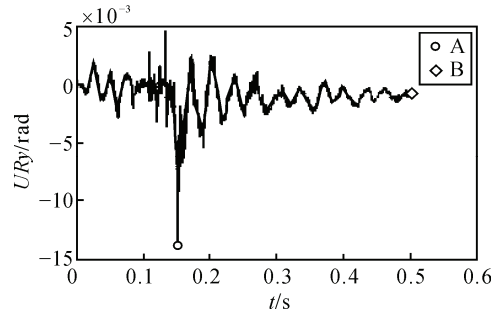


图 6 水平角位移

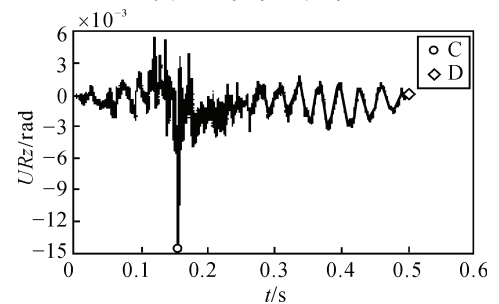


图 7 俯仰角位移

利用 Matlab 数值仿真软件，对火箭炮发射全过程炮定向器管口水平、垂直方向的角位移进行 FFT 变换<sup>[4]</sup>。定向器管口水平和垂直方向的角位移频谱曲线分别如图 8、图 9 所示。

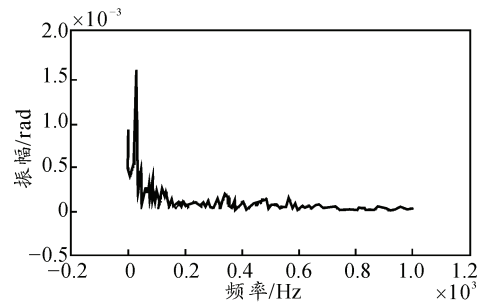


图 8 水平角位移幅频

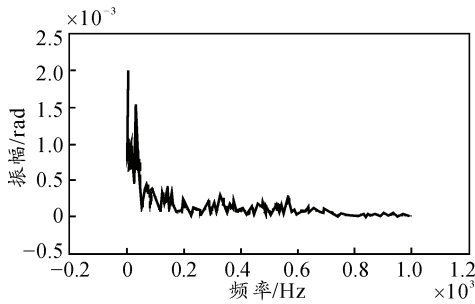


图 9 俯仰角位移幅频

从图 8、图 9 可以看出，水平、俯仰方向角位移频带较窄，对角位移贡献较大的频率主要集中在 0~200 Hz。在水平角位移幅频特性中，最大幅值产生在 33.8 Hz；在垂直角位移幅频特性中，最大幅值产生在 34.1 Hz，两者及其接近，可看作 34 Hz 对定向管口水平、垂直方向角位移贡献最大。

### 3 正交实验法的频率匹配应用

#### 3.1 正交实验法

正交实验设计<sup>[5]</sup>(orthogonal experimental design)是用来分析多个因素和多个水平问题的一种实验方法，它是基于正交性从完全实验中选出一些具有代表性的工况进行实验，这些实验工况具有“齐整可比，均匀分散”的特点。正交实验方法能在多个领域得到应用，主要原因是不仅该方法进行实验次数少，而且对实验结果进行多种分析可以得到对各因素水平有价值的认识。在确定实验因素和水平的条件下，按照正交表进行实验<sup>[6]</sup>。实践中，一般对实验结果进行方差和贡献率分析，评判各因素对实验结果的贡献率。正交表主要包含如下参数：

1) 行数(runs)：正交表中行的数目，即试验进行的次数。

2) 因素数(factors)：正交表中列的数目，即要测试的因素个数。

3) 水平数(levels)：任何各个因素可以取得到的最大值。正交表中各因素的值从 0 到数“水平数-1”或从 1 到“水平数”。

4) 正交表的形式： $L$  行数(水平数<sup>^</sup>因素数)。

表 2 为某正交实验数据。

表 2 正交实验数据

实验号	列号			实验指标 $y_i$
	1	2	3	
1	1	1	1	$y_1$
2	1	2	2	$y_2$
3	2	1	2	$y_3$
4	2	2	1	$y_4$

其中指标和的计算公式为：

$$I_1=y_1+y_2, I_2=y_1+y_3, I_3=y_1+y_4 \quad (1)$$

$$II_1=y_3+y_4, II_2=y_2+y_4, II_3=y_2+y_3 \quad (2)$$

偏差平方和的计算公式为

$$S_j=k_j\left(\frac{I_j}{k_j}-\bar{y}\right)^2+k_j\left(\frac{II_j}{k_j}-\bar{y}\right)^2+k_j\left(\frac{III_j}{k_j}-\bar{y}\right)^2 \quad (3)$$

总离差 SST 计算公式为

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

均方差计算公式为

$$V_j=S_j/f_j \quad (5)$$

纯平方和计算公式为

$$U_j=SST-f_jV_j \quad (6)$$

贡献率计算公式为

$$W_j=U_j/SST \quad (7)$$

#### 3.2 部件对系统频率的贡献率分析

选择 3 个有关因素进行条件实验：A(定向器)、B(回转体)、C(起落架)。由于该实验的目的是找出各个部件结构固有频率的改变对发射装置固有频率的影响，确定哪个因素对目标的贡献最大，哪个因素次之，而部件的固有频率与质量和刚度有关<sup>[7]</sup>，笔者通过改变质量改变部件的固有频率，依据 3 个部件的材料密度  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$ ，针对各因素分别选定了 3 个实验水平：

$$A: 0.95 \times \rho_1, \rho_1, 1.05 \times \rho_1$$

$$B: 0.95 \times \rho_2, \rho_2, 1.05 \times \rho_2$$

$$C: 0.95 \times \rho_3, \rho_3, 1.05 \times \rho_3$$

表 3 实验数据

实验号及结果	A(定向器)	B(回转机)	C(起落架)	12阶/Hz
实验1	1	1	1	34.863
实验2	1	2	2	34.675
实验3	1	3	3	34.675
实验4	2	1	2	34.019
实验5	2	2	3	33.917
实验6	2	3	1	34.863
实验7	3	1	3	33.917
实验8	3	2	1	34.863
实验9	3	3	2	34.019
总平均值 $\bar{Y}$	—	—	—	34.423
平均值 $Y_1$	34.738	34.267	34.863	—
平均值 $Y_2$	34.266	34.485	34.238	—
平均值 $Y_3$	34.266	34.519	34.169	—
平方和 SS	0.444	0.113	0.876	0.113
总离差 SST	1.546	—	—	—
自由度 $f$	2	2	2	2
均方 MS	0.222	0.056	0.438	0.056
纯平方和	0.331	7.23E-15	0.764	0.451
贡献率	0.594	4.67E-15	0.393	0.013 5

根据前面的分析结论，34 Hz 对定向器扰动贡献最大，在全炮模态分析结果中，第 12 阶固有频率

与 34 Hz 最接近, 所以对全炮第 12 阶固有频率进行正交实验, 按照上面的因素和水平进行正交实验, 实验表及结果如表 3 所示。

从上表可看出: 起落架固有频率的改变对发射装置固有频率变化的贡献率为 0.393, 定向器的贡献率为 0.594; 回转体的贡献率为  $4.67E-15$ , 远小于起落架和定向器的贡献率。所以起落架和定向器结构的改变对发射装置的固有频率变化影响显著, 可忽略回转体结构改变对发射装置固有频率的影响。

#### 4 结论

笔者通过研究可以得到以下结论: 利用发射动力学仿真得到的定向管的振动曲线, 经过 FFT 变换得到其在频域上的特性, 进而得到定向管口的共振频率。对全炮进行模态分析可以清晰地看到其固有频率与阵型, 同时得到哪一阶的频率与共振频率相近, 进而得到目标频率。将目标频率作为实验目标, 与正交实验法结合, 得到起落架与定向器固有频率

\*\*\*\*\*

(上接第 8 页)

2) 通过对复盐进行 XRD 能谱分析, 得到复盐晶体属于正交晶系, 平均晶格常数为  $a=9.878\ 9\ \text{\AA}$ ,  $b=6.758\ 6\ \text{\AA}$ ,  $c=7.118\ 8\ \text{\AA}$ , 晶体对称性高。

3) 通过对复盐进行热分析, 复盐在热分解中出现连续放热峰, 复盐的热分解性能好,  $M_xClO_4$  在复盐中起到了晶型稳定剂和催化剂的作用, 并且 2 种原材料物质发生了相互反应。

#### 参考文献:

- [1] Nerenberg R. Breathing Perchlorate[J]. Science, 2013, 340(6128): 38-39.
- [2] Jotanovic M, Andric Z, Tadic G, et al. A further study of crystallization of lithium perchlorate from  $LiClO_4$ - $NaCl$ - $H_2O$  system[J]. Applied Technologies & Innovations, 2010, 3(3): 15-22.
- [3] Ernst-Christian K. Special Materials in Pyrotechnics: III. Application of Lithium and its compounds in Energetic Systems[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2004, 29(2): 67-80.
- [4] Luca L D, Price E W, Summerfield M. Nonsteady burning and combustion stability of solid propellants[M]. U.S. AIAA, 1992: 5-13.
- [5] Hong J H, Song L, Zhou X W, et al. Non-isothermal Decomposition Mechanism and Kinetics of  $LiClO_4$  in

的改变对目标频率影响最大, 而回转体固有频率的改变对目标频率影响最小, 结构优化可以围绕起落架与定向器 2 个部件展开。

#### 参考文献:

- [1] 芮筱亭, 陆毓琪, 王国平, 等. 多管火箭发射动力学仿真与试验测试方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 13-15.
- [2] 张力. 模态分析与实验[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 28-30.
- [3] 李军. 火箭发射系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 101-110.
- [4] 侯朝焕, 阎世尊, 蒋银林. 实用 FFT 信号处理技术[M]. 北京: 海洋出版社, 1990: 56-62.
- [5] 姜同川. 正交实验设计[M]. 山东: 山东科学技术出版社, 1985: 35-38.
- [6] 沈亚丹, 何乐年, 叶益选. 基于类状态机的检测时间自调整的频率检测器[J]. 机电工程, 2013, 30(8): 937-941.
- [7] 顾培英, 邓昌, 吴福生. 结构模态分析及其损伤诊断[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008: 70-75.
- [8] Nitrogen[J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2010, 26(2): 300-303.
- [9] Hyypa J, Olander D E.  $LiClO_4$  Containing propellant compositions: U. S. Patent 4560425[P]. 1985.
- [10] Mottus E H. HOMOGENEOUS PROPELLANT COMPOSITION: U. S. Patent 3107185[P]. 1963.
- [11] Joseph M, Jeffery W, William M. Develop environmentally clean methods for processing energetic oxidizers[C]// JANNAF PDCS and S& EPS Joint Meeting. Cocoa Beach, FL: GANNAF PDCS, 2000: 201-209.
- [12] Walha S, Bouchaala M, Ben S A. The interpenetrated three-dimensional framework of a new mixed lithium / ammonium perchlorate grown in a gel medium[J]. Acta Crystallographica Section C, 2013, 69(4): 315-318.
- [13] Prince L. Microemulsions theory and practice[M]. New York: Elsevier, 2012: 10-15.
- [14] 张茜. 恩格尔复盐晶体的合成, 表征及相关相图的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012: 3-5.
- [15] Alizadeh-Gheshlaghi, Shaabani B, Khodayari A, et al. Investigation of the catalytic activity of nanosized  $CuO$ ,  $Co_3O_4$  and  $CuCo_2O_4$  powders on thermal decomposition of ammonium perchlorate[J]. Powder technology, 2012, 217(2012): 330-339.
- [16] Markowitz M M, Harris R F. The Differential Thermal Analysis of Perchlorates. III. The System  $LiClO_4$ - $NH_4ClO_4$ [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1959, 63(9): 1519-1521.