

doi: 10.7690/bgzdh.2022.05.002

车载火箭发射系统模态分析与试验研究

张 瑾, 张建新, 宋双婧, 万 晨

(江山重工研究院有限公司火箭炮研究院, 湖北 襄阳 441057)

摘要: 为提高火箭炮的寿命及射击精度, 通过试验模态分析法进行火箭炮系统模态测试。获取结构固有频率、模态振型和阻尼比等模态参数, 分析在不同胎压、支撑高度下系统的振动特性, 为火箭炮结构系统的振动特性分析、振动故障诊断和预报以及结构动力特性的优化设计提供依据。简化模态测试试验过程, 将测试获得的整车模态振动参数与有限元仿真结果对比分析。仿真结果验证了有限元分析的精确度, 提高了计算模态分析的应用价值。

关键词: 射击精度; 模态分析; 振动特性; 精确度

中图分类号: TJ71 **文献标志码:** A

Modal Analysis and Experimental Study of Vehicular Rocket Launching System

Zhang Jin, Zhang Jianxin, Song Shuangjing, Wan Chen

(Rocket Launcher Research Institute of Jiangshan Heavy Industry Research Institute Co., Ltd., Xiangyang 441057, China)

Abstract: In order to improve the life and firing accuracy of rocket launcher, the modal test of rocket launcher system is carried out by experimental modal analysis method. The modal parameters such as the natural frequency, modal shape and damping ratio of the structure are obtained, and the vibration characteristics of the system under different tire pressures and support heights are analyzed, which provides a basis for the vibration characteristics analysis, vibration fault diagnosis and prediction, and the optimization design of the structural dynamic characteristics of the rocket launcher structure system. The modal test process is simplified, and the modal vibration parameters obtained from the test are compared with the finite element simulation results. The simulation results verify the accuracy of the finite element analysis and improve the application value of the computational modal analysis.

Keywords: firing accuracy; modal analysis; vibration characteristics; accuracy

0 引言

随着现代工业的发展, 许多产品朝着轻量化、安全可靠方向发展, 对结构设计时动态特性的要求也越来越高。模态分析作为产品结构设计和性能评估的得力工具, 越来越得到关注。模态分析最主要的手段就是获得结构的相关参数, 模态参数识别是模态分析的核心。模态参数的识别能够获得结构的振动模态, 已在许多领域得到了普遍应用^[1-4]。基于外界激励作用下的模态参数识别也在航空、航天、汽车等领域得到了广泛应用。在实际工程中, 由于工程结构的复杂性和不确定性, 理论模态分析方法大都在设计阶段给予理论上的计算和评估, 在反映实际结构动态特性方面往往受到限制; 随着技术的发展, 模态测试技术在航空航天、汽车、船舶行业都得到了广泛应用。吕俊珂等^[5]对某车载高炮火力系统进行了模态研究, 但在火箭炮领域的模态分析技术并不完善, 应用较少。

火箭炮系统由起落架、回转机、发射箱、底架

及底盘总成机构组成, 是一个非常复杂的机构。目前, 对板式、梁式^[6]及简单组合体^[7]的相关试验的方法很多, 但关于火箭炮系统模态测试的方法却寥寥无几, 对于火箭炮整车模型的测点布置, 激励点的选择及相关参数的设置等都没有一个明确的参考值。这使得准确了解火箭炮系统的工作特性大都通过有限元分析^[8-9]等理论求解获取, 不能准确衡量在实际工况下系统的振动特性。在汽车行业, 模态试验技术较为成熟, 张亚飞等^[10]对客车车身进行了模态测试, 获得了相应的实际参数, 对车身设计进行了验证与分析。火箭炮模态测试属于大型复杂模型的试验, 在该领域的试验测试工作开展较少, 借鉴汽车行业模态测试经验, 通过对其模态参数的识别进而评估火箭炮系统整体的振动特性。火箭炮模态测试需投入的人力、物力庞大, 若不能准确地确定火箭炮系统测点布置、激励选择及信号分析系统参数设定, 会导致试验结果的不准确。如何更有效地获得火箭炮系统的振动特性是当前迫切要解决的问题, 笔者在此基础上开展模态测试, 并运用

收稿日期: 2022-01-22; 修回日期: 2022-02-28

作者简介: 张 瑾(1987—), 女, 河南人, 硕士, 工程师, 从事火箭炮发射动力学仿真与测试研究。E-mail: Zhang2011yujin@163.com。

有限元分析手段予以验证。

1 模态分析理论

振动分析一直是工程中对结构性能评判的重要指标。对一个振动系统存在多种物理模型和分析方法。不管何种方法，总是先建立以质量、阻尼、刚度为参数的振动微分方程，求解特征值问题，进而得到相关模态参数。对结构进行的动态性能模态分析^[5]，就是多自由度系统的模态分析，其动力学方程为：

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\}。$$

其中： $[M]$ 为整体的质量矩阵； $[C]$ 为整体的阻尼矩阵； $[K]$ 为整体的刚度矩阵； $\{x\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{\ddot{x}\}$ 分别对应着节点的位移向量、速度向量和加速度向量； $\{F\}$ 为结构承受的动载荷向量。

对于多自由度系统，将上式进行拉普拉斯变换，并且初始条件为 0，得：

$$(s^2C + sC + K)X(s) = F(s)，$$

$$X(s) = (s^2C + sC + K)^{-1}F(s)。$$

令 $H(s) = (s^2C + sC + K)^{-1}$ ，上式可写作：

$$X(s) = H(s)F(s)$$

在求解特征值问题时，令 $F(s) = 0$ ，当 $s = j\omega$ ， ω 为系统的固有频率时，系统的响应函数矩阵为：

$$H(\omega) = H(s)_{s=j\omega} = (K - \omega^2M + j\omega C)。$$

对于 N 自由度系统，就有 N 个固有频率 $(\omega_i, i = 1, 2, 3, \dots, N)$ ，也就有 N 个结构振型与之对应。

2 火箭炮模态试验

传统的模态试验测试方法确定一个结构的动力学特征是漫长而复杂的过程，涉及大量反复试验。随着测试技术的发展，LMS 测试系统模态测试因其测试精度高得到了广泛应用，但该系统需布置大量的测点才能准确模拟结构的振动特性，建模过程繁琐，数据处理流程复杂。针对中小型火箭炮、火炮系统都有其结构的特有属性，可在测试过程中适当地简化，采用 CRAS 振动分析及数据采集模块即可得到系统的模态参数，建模过程简单，数据采集及处理界面简洁，可将测试过程流程化，并缩短测试周期。图 1 所示为火箭炮系统模态测试原理。

本系统测试工况为横向模态测试，射角选取均为高低 50°，方向 0°。火箭武器的总体质量相对较大，激振器的激振力相对较小，激发全炮的各阶模态比较困难；因此，采用激振锤对其进行敲击激振，

以求激发其各阶模态。笔者选用橡胶锤头，锤体质量为 1 kg，最大冲击力可以达到 10~20 kN，可激发火箭炮的低阶模态。虽可采用敲击激振的方法激发火箭炮的振动，但由于火箭炮系统的质量较大，能够激发出来的振幅相对还是较小；因此，选用 CA-YD-109B 型高灵敏度加速度传感器。该传感器灵敏度较高、低频特性好、信噪比高，测试获得的数据可靠性强。

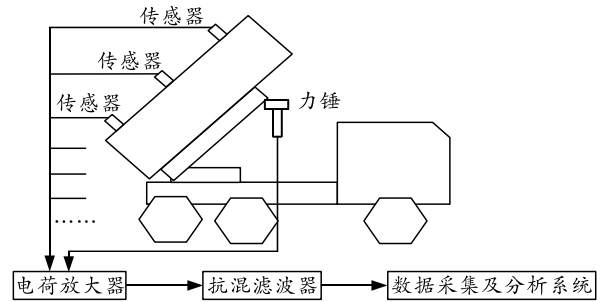


图 1 火箭炮系统模态测试原理

根据火箭炮的特点，在试验之前先进行初步有限元仿真，分析了解火箭炮系统频率分布及各阶振型。采用始终在火箭炮上某一点进行敲击激振，由初步仿真结果可知起落架前端横梁位置刚度好，有利于易激发系统低阶模态。按照如图 1 所示建立测试系统，依次测量火箭炮上各个测量点的振动响应，可获得火箭炮频率响应函数矩阵的一系列元素。将频率响应函数的曲线拟合得到火箭炮的模态参数。其中，敲击点的选择考虑 2 个因素：敲击点要选择火箭炮上相对比较刚硬的位置，不仅可以保证敲击时炮身不易产生局部变形，而且可以激发出火箭炮的振动状态。笔者选取火箭炮车体起落架下方左侧角点作为敲击点。在频率响应函数测量过程中，对每一组测试数据始终检查其相干函数，相干函数要保持在 0.8 以上，确保测量数据的可靠性。若未达到相关要求，则测量数据不可靠，则需检查原因，重新测量，直到达到要求。

对火箭炮系统的每一个测点进行锤击测试，得到所有测量数据并进行数据处理。数据处理要求如下：1) 每完成一个测试工况，从笔记本上调出测试数据，检查数据完整性；2) 对测试数据应首先进行预处理，判断信号的真伪并剔除不正常手段；3) 根据信号的具体情况和试验大纲的要求进行滤波处理，从测取的信号中选取代表真实信号的频率段，剔除虚假信号和噪声；4) 进行初始估计，实施曲线拟合、测量方向处理、约束方程处理、模态振型归一化及正交性检验，求得频响函数并进行信号数据

平均；5) 判断被测点的测量值与实际的相符程度，若差异较大，则可作为测量失败、数据不可信的判据，并重新对该点进行激励测试；6) 对改后系统进行初始估计，获得频响函数，选取特征值点。

在结构模态问题分析中，往往前几阶模态的贡献率较大，高阶模态对系统的影响较小，不做重点研究。对文中火箭炮系统模态试验及有限元计算中均取前 6 阶频率进行研究，舍弃高阶的模态。按照前述火箭炮模态试验测试方法获得系统在轮胎高压、千斤顶低位支撑时的频响函数曲线如图 2 所示。该工况下炮车的前 6 阶频率与阻尼值如表 1 所示。

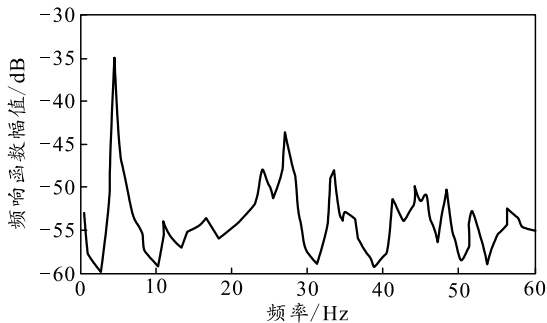


图 2 频响函数曲线

表 1 模态试验结果

阶数	频率/Hz	阻尼比/%	阶数	频率/Hz	阻尼比/%
1	4.60	1.88	4	24.20	6.77
2	11.30	1.14	5	27.80	1.90
3	17.80	2.02	6	34.10	1.87

3 试验模态分析

为有效地验证有限元模态分析的准确性，试验模态测试的研究就显得尤为重要。以某车载火箭炮系统为载体，根据文中所述的模态测试方法确定整车测点布置、激励位置及力锤的确定、选定加速度传感器、系统参数设定及实测过程中相干函数的判定来确定获得频谱函数的准确性，从而快速获得能够描述火箭炮系统在不同胎压、支撑条件下表征系统振动特性的模态参数，如表 2 所示。通过对系统频率，阻尼系数和模态振型的分析获得不同工况下火箭炮的振动特性。

表 2 不同胎压、支撑位置模态频率试验结果 Hz

阶数	高位支撑		低位支撑	
	低压	高压	低压	高压
1	4.6	4.6	4.6	4.6
2	9.9	9.9	11.3	11.3
3	17.5	18.1	16.1	17.8
4	24.8	26.0	19.3	24.2
5	29.4	30.5	26.0	27.8
6	41.0	41.0	37.2	34.1

由试验测试结果可知一阶和二阶模态对火箭炮发射过程中振动影响最大，一阶频率是主要影响因

素。千斤顶的支撑高度和轮胎的气压强度对系统一阶频率没有影响；高位支撑的二阶模态振动频率与低位支撑相比均较低，同样支撑条件下胎压对于二阶模态频率没有影响；对于更高阶模态振动频率而言，低位支撑、低压工况下频率均较低，高位支撑、不同胎压下振动频率相差不大，均处于较高水平，而低位支撑、不同胎压下振动频率相对较小，表明在高位支撑会使系统的高阶频率升高。在相同支撑条件下，胎压越高其对用的模态频率越高。同时，可根据试验模态分析结果对火箭炮的设计方案进行修正^[1]，提高系统的设计精度。

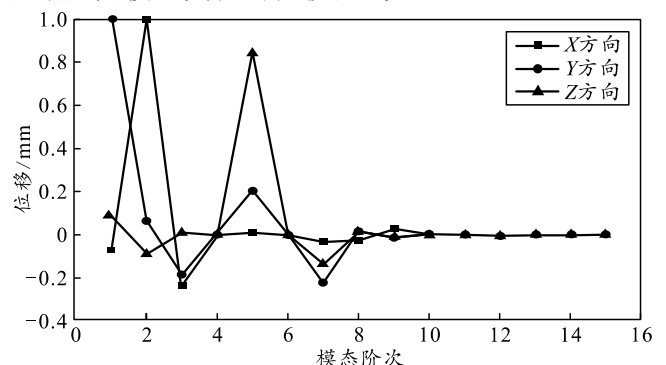
4 有限元分析

根据箱式火箭炮工作状态，针对结构实际特点建立除底盘外上装结构有限元网格模型，对箱式火箭炮发射状态进行模态分析。发射过程，行军固定器解锁，起落架通过高低机约束高角，高低射角在最大角度时发射状态最恶劣，发射过程模态振型按射角 50° 计算。固有振型振动频率及分析见表 3。

表 3 上装发射状态各阶振动情况

阶次	频率/Hz	振型说明
1	7.08	垂向弯曲
2	13.20	横向弯曲
3	31.39	2 阶扭曲
4	60.08	局部弯曲
5	62.44	主要表现为起落架弯曲变形
6	71.13	局部弯曲

根据发射状态振动频率，对发射过程存在影响的最小振动频率为 1 阶振型 7.08 Hz，此时起落架存在垂向振动，最低阶频率相对较高，很好地避开了整车的振动频率。通过分析、计算确定了射击时间间隔的合理范围，有效地避免了共振现象的出现，满足射击精度要求。为了进一步评估系统的可靠性，需分析局部位移较大区域。图 3 所示为上装发射状态箱体、起落架和回转机上对模态频率较敏感位置处结点随模态变化的位移曲线。



(a) 结点 2671188 随模态变化位移曲线

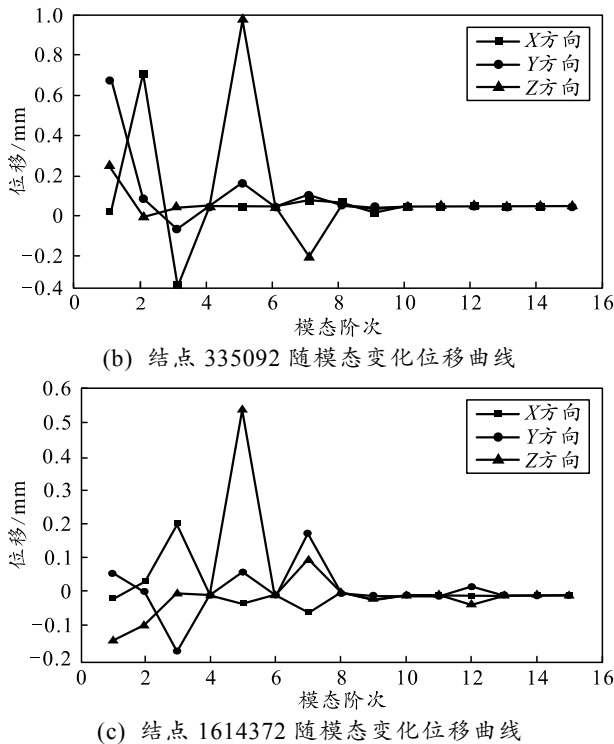


图 3 不同位置结点随着模态变化的位移曲线

可以看出：箱体结点 2671188 相对于起落架上结点 335092 和回转机上结点 1614372 来说振幅较大。这是由于箱体结点 2671188 位于系统最远端，由其上装自身结构特性造成。同时，通过不同位置结点随着模态变化的位移曲线验证了上装对前六阶模态频率的敏感性较大，高阶模态对系统的影响很小。还可看出：在发生共振时，随着模态阶数的提高，各个结点位移的变化趋势大致相同。

在上装结构网格模型的基础上，建立底盘车网格模型，使车载火箭炮系统在发射工况下的质心位置、重量均与实际相符，通过有限元分析获得整车计算模态。如表 4 所示，将有限元分析获得的整车前六阶模态与前文所述的试验值比较。

表 4 整车模态计算值与试验值频率对比

阶数	计算值/Hz	试验值/Hz	误差/%
1	4.73	4.6	2.7
2	10.80	11.3	4.6
3	18.20	17.8	2.2
4	25.50	24.2	5.1
5	29.70	27.8	6.4
6	36.30	34.1	6.1

由上表可知，计算值与试验值最大偏差为 6.4%，低阶频率偏差相对较小，高价频率偏差较大。实际试验工况在不同支撑位置、胎压下的频率均不同，特别是高阶频率相差较大。从模态试验结果与有限元计算结果的一致性来讲，有限元的分析结果还是可以接受的^[12]，可认为有限元分析结果与实际

相符，验证了有限元分析的有效性和准确性。

5 结束语

笔者提供一种高效准确的火箭炮系统模态测试方法，明确测试流程，提供火箭炮系统模态测试基本参数设置，简化模态测试试验过程，明确系统参数设定及实测过程中相干函数的判定来确定获得频谱函数的准确性判别准则，从而获得能够描述火箭炮系统在不同胎压、支撑高度下振动特性系统的模态参数流程化。通过对系统频率，阻尼系数和模态振型的分析，获得不同工况下火箭炮的振动特性。通过模态分析获得火箭炮系统在不同发射工况下的振动特性和动力响应，实现低成本、大幅度提高多管火箭射击密集度。运用模态分析技术，将试验模态与计算模态对比，提高模态仿真分析的精确度，使模态分析从事后实物验证转换为事前仿真分析，切实提高模态分析的应用价值。

参考文献

- [1] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000: 2-21.
- [2] 李德葆. 振动模态分析及其应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1989: 110-162.
- [3] 梁君, 赵登峰. 模态分析方法综述[J]. 现代制造工程, 2006(8): 139-141.
- [4] 沃德·海伦, 斯蒂芬·拉门兹, 波尔·萨斯, 等. 模态分析理论与试验[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001: 171-220.
- [5] 吕俊珂, 程广伟, 苏林柏, 等. 某车载高炮火力系统模态分析[J]. 兵工自动化, 2019, 38(5): 70-73.
- [6] 刘建英, 王效岳, 宫金良. 考虑不同边界条件悬臂梁的模态研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(19): 221-226.
- [7] 苏忠亭, 徐达, 杨明华, 等. 基于模态试验的某火炮身管有限元模型修正[J]. 振动与冲击, 2012, 31(24): 54-59.
- [8] 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, 2009, 30(6): 111-115.
- [9] 吕俊珂, 程广伟, 胡勇, 等. 基于 Workbench 的车载高炮炮身模态分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2016(37): 36-39.
- [10] 张亚飞. 客车车身结构模态分析[J]. 汽车实用技术, 2018(18): 74-75, 86.
- [11] 陈伟文. 中型客车车身模态试验与结构分析[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [12] 孙海文, 胥磊. 某火箭模态分析与模态试验[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(6): 176-179.