

环境试验与评价

大尺寸液体火箭发动机机架振动试验 加载装置设计

魏英魁, 毕京丹, 胡彦平, 代振梦

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: **目的** 设计大尺寸液体火箭发动机机架振动试验加载装置, 使该型号发动机机架可顺利完成振动试验考核。**方法** 在满足连接强度基础上, 合理设计加载装置的加强筋等结构的布局, 并通过有限元计算方法对加载装置进行优化设计, 进一步提高加载装置一阶固有频率。**结果** 设计完成了振动试验加载装置, 并在该型号机架振动试验中得到了工程应用。**结论** 加载装置一阶固有频率较高, 完全满足振动试验加载要求。

关键词: 液体火箭发动机; 振动试验; 动力学; 有限元计算

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.03.019

中图分类号: V432

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)03-0092-03

Design of Loading Device for Large Scale Liquid Rocket Engine Frame Vibration Test

WEI Ying-kui, BI Jing-dan, HU Yan-ping, DAI Zhen-meng

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: **Objective** To design a loading device for vibration test of large-scale liquid rocket engine frame, so that the vibration test of this type of engine frame can be completed successfully. **Methods** On the basis of satisfying the connection strength, the layout of the structure such as the stiffener of the loading device was reasonably designed, and the loading device was optimized by the finite element method to further improve the first inherent frequency of the loading device. **Results** The design of loading device for vibration test is completed and applied in the vibration test of this type of frame. **Conclusion** The first inherent frequency of the loading device is higher, which fully meets the loading requirements of vibration test.

KEY WORDS: liquid rocket engine; vibration test; dynamics; FEM (finite element method)

在以往的液体火箭发动机研制过程中, 一般均先通过理论计算和有限元仿真计算的方式研究发动机在振动环境下的响应和应力应变情况^[1-3], 并针对应力或应变较大的结构进行合理优化设计^[4-6]。优化后的液体发动机机架及附属部件均要在正式试车前进行振动试验考核, 以验证结构改进的合理性, 并进一步提高液体发动机的可靠性。

某型号液体火箭发动机为新研大尺寸发动机, 对结构形式与部件布局都进行了全新设计, 其机架及附属部件产品改动较大, 需验证其在振动环境下的结构

可靠性。由于发动机双机机架底部对接孔的对应尺寸大于振动台滑台台面尺寸, 需设计专用加载装置来满足与振动台面的对接要求。同时发动机双机机架需进行三方向振动试验, 需设计专用振动试验加载装置来满足振动试验频率的需求。

1 设计思路

所要设计的振动加载装置应具备连接振动台轴向台面、滑台与发动机双机机架的功能, 同时加载装

置还应满足如下性能要求：加载装置一阶共振频率要高；在满足加载装置一阶频率的基础上，加载装置的质量要小；在满足连接强度基础上，需合理设计加载装置的结构布局，进一步提高一阶固有频率。

为解决以上问题采取技术方案如下。

1) 为保证机架与振动台滑台台面的连接要求，根据滑台钢套分布与双机机架对接孔尺寸进行协调，采用分体式加载装置，包含长船形和连接头加载装置两部分。根据振动台轴向台面小的特点，轴向试验时，采用长船形与连接头加载装置组合，将激励输入面扩展到 2.95 m；横向试验中，直接采用转接头加载装置实现连接，减小附加质量，从而减小振动台能量输出。

2) 为提高加载装置一阶频率，在经验设计的基础上进行有限元优化设计，通过不断改变外形尺寸和材料质量分布来提高一阶固有频率。通过分析加载装置各阶模态与结构布局的关系，计算优化了各部位的尺寸、加强筋、安装孔和钢套的布局，总结出合理结构布局。

2 设计实施

2.1 初步设计

为满足大尺寸试件与振动台的连接要求，加载装置设计为分体式，加载装置初步设计外形如图 1 所示。可以看出，两部分加载装置上下表面均进行了打孔。图 1a 中，底部为连接振动台的 $\phi 22\text{ mm}$ 通孔，上面两端为与转接头加载装置对接的 $\phi 18\text{ mm}$ 通孔。图 1b 中，上端为连接机架底部对接孔的 M16 mm 钢套，底部为与长船形加载装置对接的 $\phi 18\text{ mm}$ 通孔。

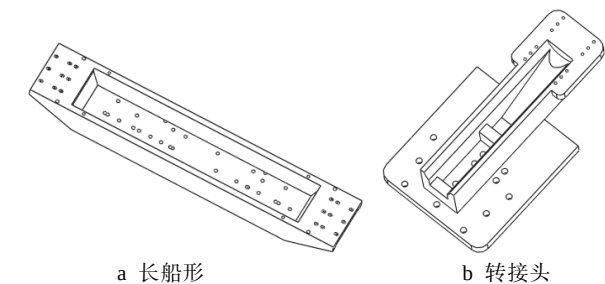


图 1 加载装置外形

2.2 结构优化设计

由于发动机双机机架自身质量较大（1.5 t），同时振动试验量级较高（随机振动满量级达 16g），因此加载装置须在保证强度和一阶频率的前提下尽量减轻质量。长船形加载装置内部采用中空处理，在中间及对接处设计加强筋，以保证连接强度。同时提高一阶频率，每次修改均进行一阶模态计算分析^[7-9]，其改进过程见表 1。

表 1 长船形加载装置优化设计过程

改进后结构图	结构改进内容	一阶模态频率/Hz
	中间添加加强筋	235.67
	两端分别添加短加强筋	514.78
	延长两端加强筋及其他细节优化	743.97

最终优化完成的长船形加载装置的一阶振型如图 2 所示。可以看出，长船形加载装置一阶固有频率较高，为 743.97 Hz，振型为两端翘曲。同样对转接头加载装置进行优化设计，其改进过程见表 2。

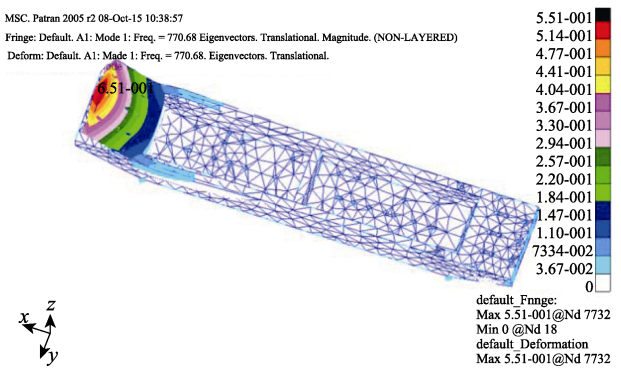


图 2 长船形加载装置一阶振型

表 2 转接头加载装置优化设计过程过程

改进后结构图	结构改进内容	一阶模态频率/Hz
	端部添加加强筋	426.32
	中间添加加强筋	635.16
	后部添加加强筋及其他细节优化	821.25

分体式加载装置组装如图 3 所示。对两者组合加载装置进行模态计算分析^[10-12]，分体式加载装置组合体有限元单元剖分结果如图 4 所示，模态计算一阶振型结果如图 5 所示。

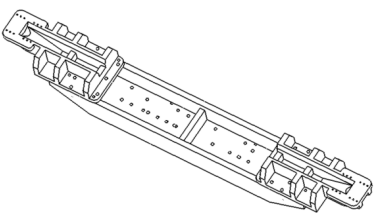


图 3 分体式加载装置组装

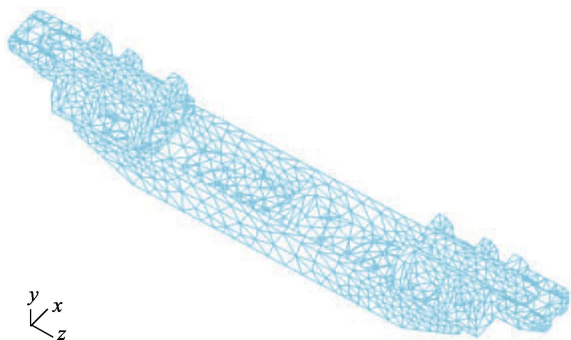


图4 组装加载装置有限元网格划分

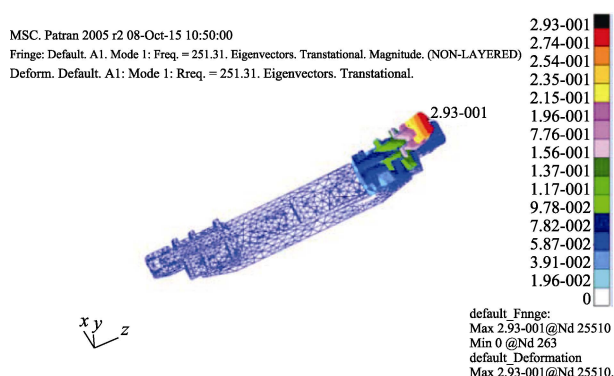


图5 加载装置一阶振型

由一阶振型图可以看到,一阶固有频率较高,为251.31 Hz,适用振动试验频谱范围广,满足该型号液体火箭发动机双机机架振动试验的加载要求。加载装置、振动台与机架组合试验装置如图6所示。

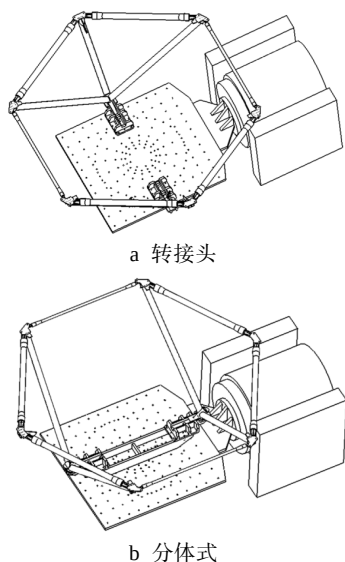


图6 加载装置振动试验系统

4 结论

通过大尺寸试件振动试验加载装置设计技术,

设计完成了某型号液体火箭发动机机架振动试验加载装置。采用分体式设计,分为长船形与转接头加载装置两部分,并对两种加载装置进行了有限元模态分析和结构优化,最终完成了加载装置设计并进行了加工。

对加工完成的加载装置组装进行试验测试^[13-15],试验条件如下:轴向正弦扫描,扫描速率为4 oct/min,频率为20~1000 Hz,载荷为0.3g。

由振动正弦扫描结果测得,两端激振情况下,加载装置一阶共振频率为248 Hz,与计算结果251.31 Hz接近,这也进一步表明了有限元计算优化设计的准确性。同时经过振动试验测试实践,试验加载装置完全满足大尺寸液体火箭发动机机架振动试验加载要求。

参考文献:

- [1] 胡存明, 易宏强, 周静, 等. 大推力发动机机架变形对火箭姿态的影响研究[J]. 上海航天, 2016, 33(增刊): 91-96.
- [2] 董寻虎, 张晓漫. 某火箭发动机系统振动特性测试和仿真分析[J]. 火箭推进, 2006, 32(1): 54-56.
- [3] 李斌潮, 邓长华, 周云端, 等. 液体火箭发动机阻尼机架减振特性研究[J]. 火箭推进, 2013, 39(2): 47-50.
- [4] 柴皓, 周进. 基于有限元方法的液体火箭发动机机架优化设计[J]. 导弹与航天运载技术, 2008, 293(1): 16-18.
- [5] 霍世慧, 袁军社, 徐学军, 等. 双推力室机架快速优化设计方法研究[J]. 火箭推进, 2015, 45(4): 56-59.
- [6] 武新峰, 雷勇军, 李磊. 液体火箭发动机公路运输响应分析与支撑方案优选研究[J]. 强度与环境, 2009, 36(6): 9-13.
- [7] 龙凯, 贾长治. 动力学有限元应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013, 167-188.
- [8] 张永昌. MSC.Nastran 有限元分析理论基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [9] 许江文, 武艳波, 马洪斌. 振动试验夹具设计及模态分析[J]. 机械研究与应用, 2013, 26(1): 3-4.
- [10] 王轲, 孙妍妍, 茅志颖. 振动试验夹具动力学设计的综合优化方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(3): 483-485.
- [11] 魏英魁, 张晓颖, 毕京丹, 等. 某型号导引头振动试验夹具的设计与实践[J]. 强度与环境, 2015, 42(2): 27-31.
- [12] 熊伟华, 王大兵, 王凤车, 等. 振动试验夹具设计及频率响应特性研究[J]. 环境技术, 2015, 31(2): 56-57.
- [13] 马征, 李东强, 顾阳, 等. 某异型结构振动夹具的设计及试验验证[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 90-94.
- [14] 吴瑞轩. 振动夹具的测试方法研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 252-255.
- [15] 孙晔, 陆海桃, 张海英, 等. 振动试验夹具结构动态设计及试验验证[J]. 机械强度, 2017, 39(5): 1210-1214.