

某异型结构振动夹具的设计及试验验证

马征, 李东强, 顾阳, 刘凯

(湖北航天技术研究院总体设计所, 武汉 430040)

摘要: **目的** 完成某异型飞行器的振动夹具设计。**方法** 对初步设计的夹具进行有限元模态仿真计算、传递均匀性仿真计算, 结合仿真计算结果, 有针对性地对夹具进行设计改进。经仿真计算, 设计改进后夹具满足设计固有频率及均匀性要求。**结果** 夹具固有频率的试验结果与仿真计算误差约为7%, 均匀性也较吻合。**结论** 验证了仿真计算结果的正确性、设计的合理性, 该异型飞行器振动试验进一步验证了该夹具传递特性也较好。

关键词: 异型结构; 振动夹具; 仿真计算

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.03.018

中图分类号: TJ760.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2017)03-0090-05

Design and Experimental Verification of a Special Shaped Vibration Fixture Structure

MA Zheng, LI Dong-qiang, GU Yang, LIU Kai

(Hubei Aerospace Technology Research Institute HQ Designing, Wuhan 430040, China)

ABSTRACT: Objective To design a vibration fixture of a special shaped aircraft. **Methods** Firstly, the finite element modal simulation calculation and the uniformity simulation calculation were carried out for the preliminary design of the vibration fixture. The vibration fixture was improved based on the simulation results. By calculation, the fixture after design improvement met the design requirements on frequency and uniformity. **Results** There was an error of 7% between the natural frequency test result of the fixture and simulation calculation. The uniformity was also consistent. **Conclusion** The result of simulation calculation is correct and the design is reasonable. The transfer characteristic of the fixture is good.

KEY WORDS: special shaped structure; vibration fixture; simulation calculation

随着技术的发展, 无人机、卫星、火箭与导弹等飞行器的结构越来越复杂, 飞行环境也越来越恶劣, 需要严苛的地面试验来考核。振动试验是其中一项极为重要的试验, 而振动夹具的设计又是振动试验能否顺利完成的关键一环。

振动夹具的作用是把振动台动载荷传递到试验试件上, 使试验试件产生与要求振动谱形相一致的强迫振动。如果振动夹具设计不合理, 可能使试验试件受到的振动环境产生失真, 造成“欠试验”或“过试验”; 也可能影响振动控制, 使振动控制某些频率段

超差严重, 使试验难以进行; 还有可能由于夹具传递特性差, 造成振动台推力损失大, 使现有振动台无法满足试验振动量级要求。因此, 振动夹具设计是否合理直接影响到振动试验的效果, 而设计合理的振动夹具, 关键在于夹具的一阶固有频率要尽量高, 且均匀性和传递特性要好^[1-14]。

文中针对某飞行器的某异型结构, 在无该类型结构振动夹具设计经验的情况下, 使用有限元软件分析改进了该结构夹具的结构形式, 减少了设计的盲目性, 通过试验验证了仿真计算的正确性、设计

的合理性,并最终较好地完成了该异型结构振动试验。

1 设计要求

该异型结构质量约为 300 kg, 振动条件为随机振动, 控制谱均方根值为 13g, 振动方向为轴向, 试验频段为 10~2000 Hz。要为该结构设计一个固有频率超过 2000 Hz 的夹具是不现实的。根据相关文献^[4-5]: 夹具的一阶固有频率大于试件一阶频率的 3 倍, 则试件的响应接近理想值。考虑结构固有频率特性及振动试验要求, 该结构夹具应满足以下要求。

1) 固有频率: 夹具的一阶固有频率应大于 600 Hz。

2) 均匀性: 要求夹具与结构连接面的均方根值之差控制在 ± 3 dB 范围内。考虑到夹具为异型, 存在短轴与长轴处响应差别较大情况, 要求与结构连接面短轴、长轴位置处的均方根值之差控制在 ± 6 dB 范围内。

2 夹具设计

2.1 材料选择

振动试验夹具的材料应选用比刚度大、阻尼大的材料, 常用的金属材料为钢、铍、镁合金和铝合金。其中铝合金的比刚度大、阻尼大, 易加工和焊接, 应用最为广泛^[7]。该夹具材料选用铝合金 5A06。

2.2 制造工艺选择

振动夹具的制造工艺主要有铸造法和焊接法, 焊接法简单且加工效率高, 加工时间和费用分别为铸造的 1/7 和 1/3。随着焊接技术的不断提高, 目前焊接件的强度能达到原材料的 80% 以上^[7]。综合考虑, 该结构振动夹具制造工艺选用焊接法。

2.3 夹具的最大允许质量

夹具的最大允许质量与振动试验所需推力有关, 考虑到夹具在振动传递时的推力损失, 结构振动试验所需推力应不超过振动台最大推力的 80%。使用 16 t 振动台 (最大随机推力为 160 kN, 动圈质量为 200 kg) 来进行试验, 该结构夹具的最大允许质量按式 (1) 计算。经计算, 夹具的最大允许质量约为 500 kg。

$$F_{\text{rms}} \geq (m_{\text{结}} + m_{\text{动}} + m_{\text{夹}}) a_{\text{rms}} \quad (1)$$

式中: F_{rms} 为振动台推荐使用的最大推力, 16 t 振动台约为 128 kN; a_{rms} 为该异型结构的最大振动量级 (127.4 m/s^2); $m_{\text{能}}$ 为该异型结构的质量; $m_{\text{夹}}$ 为夹具的最大允许质量。

2.4 夹具的结构设计

夹具的结构设计主要依据振动台动圈的安装孔位置、尺寸和结构后端框连接孔形式、位置及尺寸等进行设计。同时, 考虑了结构后端面有无突出物 (如定位销等)、加速度计粘贴位置、电缆线布置、起吊和安装是否方便等问题。

2.4.1 初步设计及仿真计算

初步设计的结构形式参照常规圆柱形结构的振动夹具形式进行, 主要由厚度均为 30 mm 的上平板、下平板和 8 块筋板组成, 高度为 210 mm, 夹具质量为 80 kg。考虑夹具传递的均匀性, 在长轴和短轴部位均布置肋板。使用 MSC.Patran/Nastran 软件进行有限元仿真计算, 仿真模型采用六面体单元, 单元基本尺寸为 10 mm, 单元总数为 35 925 个, 节点总数为 47 834 个。将夹具下平板螺栓孔上的节点建立 MPC, 其有限元模型见图 1。

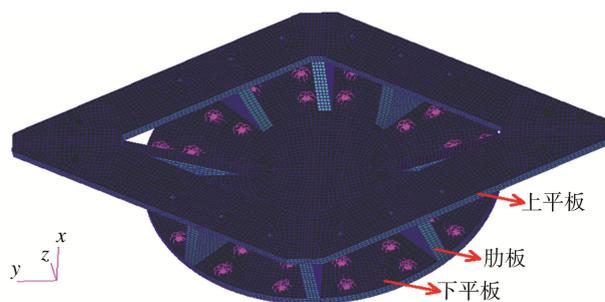


图 1 有限元模型

模态计算时, 约束 MPC 6 个自由度以模拟其固定在振动台上状态, 一阶模态频率为 409.73 Hz, 振型为沿中心轴旋转, 其一阶模态振型见图 2。

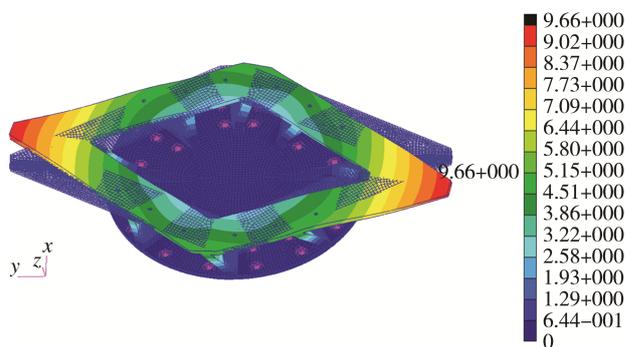


图 2 一阶模态振型

均匀性计算时, 约束 MPC 除轴向外的其余 5 个自由度, 对 MPC 加载轴向加速度载荷计算频响。频响计算完后对夹具施加幅值为 $0.002 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 、频率为 10~2000 Hz 的平直谱随机激励 (均方根值为 2g), 短轴、长轴处在轴向上的均方根值分别为 3.799g, 9.052g, 响应图谱对比见图 3。

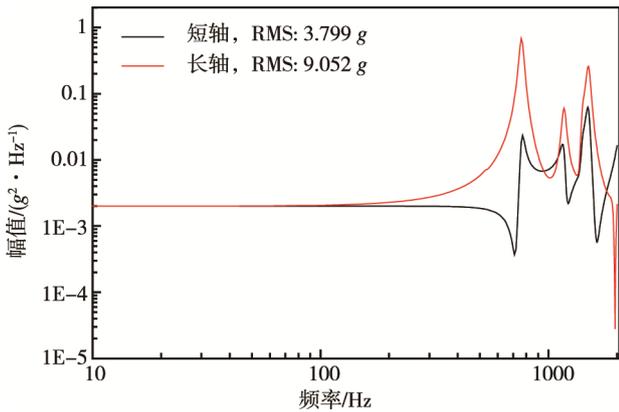


图3 短轴、长轴响应图谱对比

由模态振型可知,肋板和上平板长轴部位的刚度较弱,该夹具不满足一阶固有频率应大于 600 Hz 的要求。均匀性计算仅加载了轴向载荷(振动台实际工作时会有—定的横向运动),虽未激励出夹具其他方向的模态(如一阶旋转模态),但不影响对夹具轴向均匀性的预示指导作用。根据均匀性计算结果,短轴、长轴位置处均方根值之差约为 7.5 dB,不满足均匀性要求。

2.4.2 改进设计及仿真计算

针对初步设计夹具存在肋板和上平板长轴部位刚度较弱的问题,在初步设计夹具的基础上增加了 8 块肋板和 1 个圆环筋。圆环筋高度为 90 mm,厚度为 30 mm,其中长轴位置附近处肋板厚度改为 40 mm,并对长轴处肋板与上平板连接处的凸台做了加高处理,夹具质量为 115 kg。采用相同方法建立改进后夹具的有限元模型,并进行模态计算和均匀性计算。改进后夹具的一阶模态频率为 723.18 Hz,振型为沿中心轴旋转,其有限元模型和一阶模态振型分别见图 4 和图 5。短轴、长轴处在轴向上的均方根值分别为 3.386g, 6.592g, 响应图谱对比见图 6。

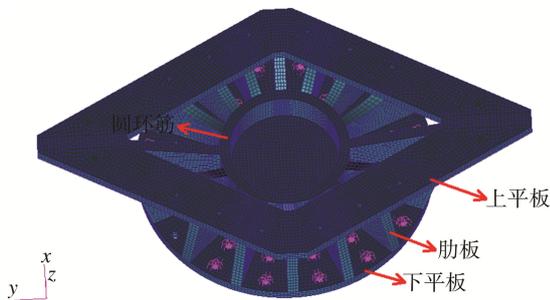


图4 改进后的有限元模型

改进后夹具的质量增加了 35 kg,但—阶固有频率比初步设计夹具提高了 77%,夹具的固有频率提升效果明显,满足夹具—阶固有频率大于 600 Hz 的要求。同时短轴、长轴位置处均方根值之差约为 5.8 dB,均匀性有一定的改善,改进后工装质量远小于最大允

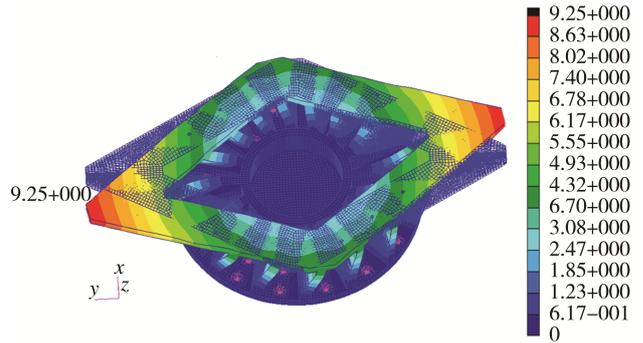


图5 改进后的一阶模态振型

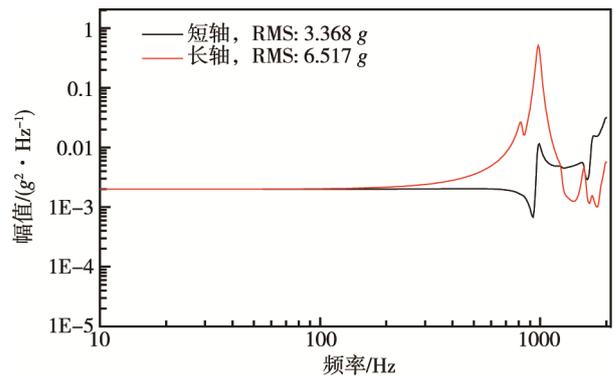


图6 改进后短轴、长轴响应图谱对比

许质量,均匀性仍有较大的提升空间。考虑到以往没有该异型结构振动试验经验,其推力损失有可能会很大,若继续加厚肋板等会使工装质量增加,振动台推力余量变小。同时会造成连接螺钉的操作空间小、安装困难,且改进后工装已满足均匀性要求,因此对均匀性未做进一步提升改进。

3 试验验证

3.1 模态试验

将改进后的夹具固定在振动台上,使用 LMS 模态试验设备对夹具进行模态试验验证。试验采用锤击法,锤击位置为上平板长轴部位,采用力锤锤击 x, y, z 三个方向,以获取的频响函数进行模态分析,得到夹具的一阶固有频率为 776.97 Hz,振型为沿中心轴旋转。试验验证主要测点位置见图 7,测得的一阶模态振型见图 8。

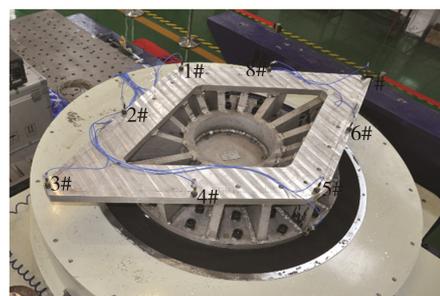


图7 试验验证主要测点位置

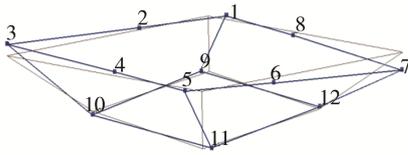


图 8 试验验证一阶模态振型

改进后夹具的模态试验表明，夹具一阶固有频率比仿真计算高约 7% (54 Hz)。主要原因是仿真计算将夹具下平板螺纹孔完全刚性约束，忽略了振动台、螺栓连接、焊接等影响因素。根据上述分析，模态仿真计算结果与试验验证结果基本吻合，改进后夹具满足固有频率要求。

3.2 均匀性试验

在振动台上，将控制点放置在夹具下平板中心位置，加速度计布置在上平板上，位置同图 7。对夹具施加与仿真计算相同的平直谱随机激励，其测点均方根值结果统计见表 1。1#测点（短轴位置）、2#测点（短轴与长轴中间位置）、3#测点（长轴位置）处的响应对比见图 9。以短轴位置处响应为例对比，1#测点、5#测点的响应对比见图 10。

根据表 1 可知，夹具上平板测点的最小均方根值为 3.41g (1#测点)，与最大均方根值 6.75g (3#测点) 相比，其差值控制在 ±6 dB 范围内。根据表 1 和图 10，各测点沿短轴或长轴对称位置处基本一致，差值均控制在 ±3 dB 范围内。根据图 9 和图 10，夹具的一阶固有频率在 750 Hz 附近，进一步验证了仿真计算的正确性，改进后夹具均匀性满足设计要求。

表 1 测点均方根值统计 g

短轴位置		长轴位置		短轴与长轴中间位置			
1#	5#	3#	7#	2#	4#	6#	8#
3.41	3.71	6.75	6.63	4.01	3.67	3.74	4.27

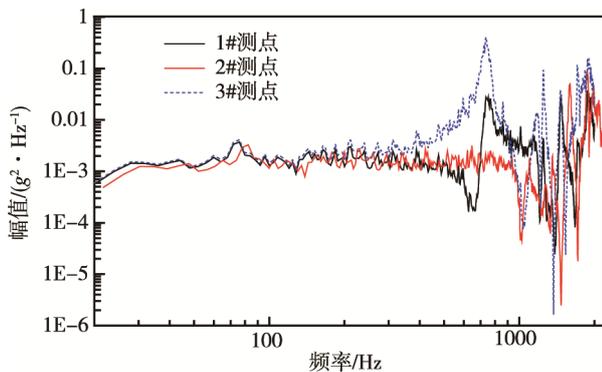


图 9 1#、2#、3#测点的响应对比

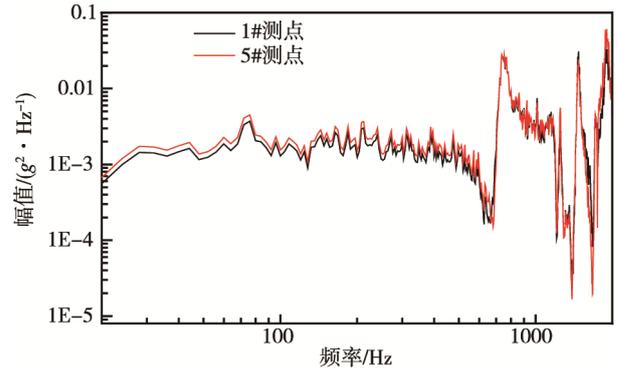


图 10 1#、5#测点的响应对比

3.3 异型结构振动试验

后续使用该夹具进行异型结构的振动试验，试验的两个控制点位于夹具与异型结构端框连接的长轴部位，振动试验控制谱图见图 11。根据图 11 可知，振动控制谱均在要求值的 ±3 dB 范围内，满足试验控制要求。该结构的振动试验量级为 13g，振动台动圈处的监测点响应为 10.3g，即夹具在振动传递过程中，不仅没有衰减，还有所放大，说明夹具的传递特性也较好。该夹具顺利完成了异型结构振动试验。

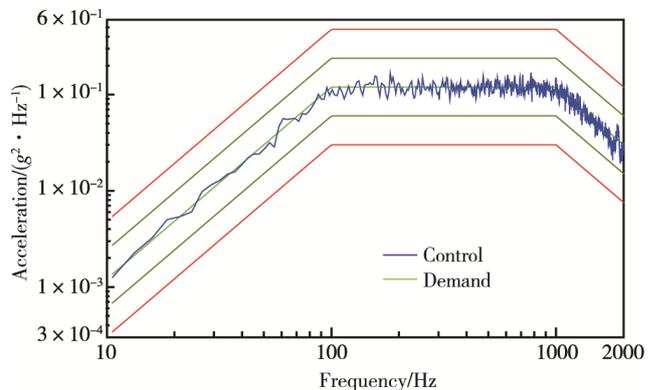


图 11 振动控制谱图

4 结语

针对某异型结构开展了振动夹具设计，对初步设计的夹具进行有限元模态仿真计算、传递均匀性仿真计算。根据仿真计算结果有针对性地对夹具进行了改进，并通过模态试验、均匀性试验及结构试验验证了夹具设计合理有效。该夹具的设计过程对其他夹具设计具有较好的借鉴作用。

参考文献：

- [1] 李金飞, 黄卫东. 固体推进剂振动试验夹具设计[J]. 机械制造, 2013, 42(4): 36—38.
- [2] 范东林, 张海伟, 石剑平, 等. 某型导弹前舱振动夹

- 具设计[J]. 制造业信息化, 2013(11): 133—135.
- [3] 俞秋惠, 陈剑. 振动试验夹具的优化设计及模态试验[J]. 噪声与振动控制, 2010(12): 67—69.
- [4] 张志旭, 朱学旺. 振动夹具一阶共振频率的试验数据识别[J]. 航天器环境工程, 2009(12): 62—64.
- [5] 沈颖凡, 刘士华, 王鹏. 某型机载红外仪振动夹具设计[J]. 科学技术与工程, 2008(11): 6106—6109.
- [6] 朱姝, 常志刚. 振动冲击试验夹具设计技术研究与实践[J]. 环境技术, 2009(3): 14—19.
- [7] 姜同敏. 振动冲击试验夹具设计制造技术[J]. 航空工程与维修, 1997(5): 21—23.
- [8] 徐鹏, 朱孝政, 蒲海峰. 反坦克导弹弹上小型部件试验夹具[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(11): 56—58.
- [9] 胡时岳. 机械振动与冲击测试技术[M]. 北京: 北京科学出版社, 1983.
- [10] 胡波, 何林. 振动试验夹具的设计[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2005, 23(3): 45—48.
- [11] 毛勇建. 一种典型冲击试验夹具的优化设计[J]. 强度与环境, 2003, 30(1): 1—6.
- [12] 邢天虎. 力学环境试验技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.
- [13] 振动与冲击手册编辑委员会. 振动与冲击手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [14] 胡志强, 法庆衍. 随机振动试验应用技术[M]. 北京: 计量出版社, 1996.