

某导弹舱段振动夹具动特性设计与试验验证

皮志超¹, 罗立生², 孙涛¹, 史治宇³

(1. 上海航翼高新技术发展研究院有限公司, 上海 200082;
2. 中国人民解放军第五七一八工厂, 广西 桂林 541003; 3. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要:具备优良动特性的振动夹具是机载设备振动试验成功的保证。根据振动夹具动特性设计原则,设计某导弹舱段的振动夹具,应用 MSC/Nastran 软件对夹具进行模态和随机振动响应计算,同时设计夹具试验验证方法,并完成夹具的振动验证试验。振动夹具动特性计算结果与试验结果吻合,满足夹具动特性设计要求。

关键词:导弹舱; 振动夹具; 振动试验; 有限元方法; 试验验证; 功率谱密度

中图分类号: O324; TB123 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2022)03-0201-03

Dynamic Characteristics Design and Experimental Verification of Missile Cabin Vibration Fixture

PI Zhichao¹, LUO Lisheng², SUN Tao¹, SHI Zhiyu³

(1. Shanghai Hangyi Research Institute of High-tech Development, Shanghai 200082, China;
2. The People's Liberation Army No. 5718 Factory, Guilin 541003, China;
3. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: As the vibration fixture with excellent dynamic characteristics is the guarantee of successful vibration test of airborne equipment, the vibration fixture of a certain missile cabin is designed according to the design principle of dynamic characteristics of vibration fixture. The modal and random vibration response of the fixture are calculated by MSC/Nastran software. Meanwhile, the fixture test verification method is designed to complete the vibration verification test of the fixture. The calculated results of dynamic characteristics of vibration fixture are in good agreement with the experimental results, which meets the requirements of the dynamic characteristics of fixture.

Keywords: missile cabin; vibration fixture; vibration test; FEM; experimental verification; PSD

0 引言

为保证机载设备的可靠性,在设备研制和维修过程中都需要按照国军标 GJB150.16A—2009 进行相应的振动试验^[1]。振动夹具是将机载设备按工作状态安装于振动台上并将振动台的能量和振动试验谱特性传递到机载设备上的结构。理想的夹具应具有优秀的动特性,确保设备在振动试验中不会出现“过试验”或者“欠试验”的现象^[2]。国内还没有夹具动特性设计的国军标,振动夹具一般可依据相关的振动理论、美国圣地亚实验室的振动夹具设计规范^[3]以及振动试验国军标进行综合参考与设计。文献[4-7]研究了机载设备的振动夹具设计以及振动夹具的试验测试方法。

本文对某导弹舱段振动夹具的动特性设计和试验验证开展研究,基于夹具设计基本要求和流程,设计了产品振动夹具,应用 MAC/Nastran 软件对夹具进行了有限元建模、模态分析以及频响和随机振动响应分析,并设计振动试验方法和步骤,经过试验验证了振动夹具的动态特性。

1 振动夹具设计

1.1 振动夹具设计输入条件

某机载导弹舱段,最大外形尺寸为 $\Phi 220\text{ mm} \times 1\ 080\text{ mm}$,如图 1 所示的圆柱段,最低阶频率为 279.9 Hz,质量为 50.23 kg,质心居中。其随机振动试验的功率谱如图 2 所示,加速度方均根值 R_{MS} 为 8.36g,垂直方向振动,时间为 10 min。



图 1 某机载导弹舱段示意图

振动试验所用电动振动台型号为 DC-10000,额定激振力为 54 kN,频率范围为 2~2 500 Hz,动圈质量 40 kg,转

第一作者简介:皮志超(1986—),男,安徽芜湖人,工程师,硕士研究生,研究方向为机械设计、材料工程及表面工程应用。

接板质量 10 kg。转接板的连接孔几何尺寸如图 3 所示。

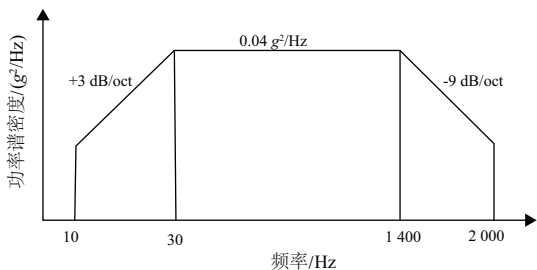


图 2 某机载导弹舱段的随机振动功率谱

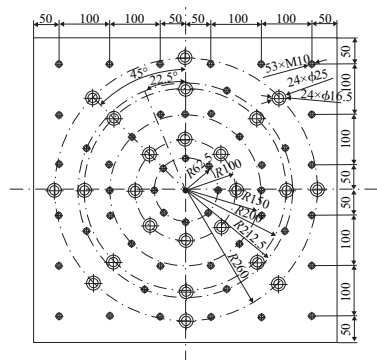


图 3 转接板连接孔几何尺寸图

1.2 振动夹具动特性设计要求

振动夹具动特性设计的具体要求为:1) 振动夹具与导弹舱段连接方便,并确保其振动试验与机载工作状态受力一致;2) 振动夹具的基频大于导弹舱段基频的 2 倍以上;3) 振动夹具在 500 Hz 以下没有共振峰,500~2 000 Hz 允许有 5 个共振峰,共振峰处放大因子≤6;4) 夹具与导弹舱段连接处的正交性运动放大系数<1,各连接点处振动响应在 2 000 Hz 以内的振动偏差≤±100%。

1.3 振动夹具设计结果

振动夹具的设计流程主要分为夹具最大质量预估、初始设计、夹具与试验产品合质心计算、夹具有限元建模和分析、夹具结构修改迭代 5 个步骤。夹具最大允许质量可根据振动台推力和试件质量按下式估算:

$$(M_f + M_i + M_a) a \leq F \quad (1)$$

式中: M_f 、 M_i 和 M_a 分别为夹具、产品和动圈的质量; a 为正弦加速度峰值或随机振动加速度的方均根值; F 为振动台的最大推力。考虑安全裕度,取最大允许质量的 70%,得夹具质量应约<350 kg。按照振动夹具设计流程,振动夹具结构的设计图如图 4 所示。

2 振动夹具动特性分析理论基础

应用 Hamilton 原理,对振动夹具进行有限元建模,建立如下的结构动力学方程:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F}(t) \quad (2)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 和 $\mathbf{F}(t)$ 分别是结构的质量矩阵、阻尼矩阵、

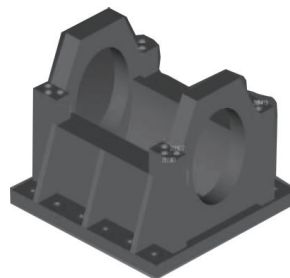


图 4 振动夹具设计图

刚度矩阵和载荷列阵。

上述方程参见文献[8]。对于无阻尼系统自由振动,略去式(2)中的阻尼矩阵和载荷向量,其解可转化成下列方程的特征值问题:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \{\varphi\} = \{0\} \quad (3)$$

式中 ω 和 $\{\varphi\}$ 分别为夹具结构的固有频率和振型。

根据频率响应函数结构的固有特性,描述响应输出与激励输入傅里叶变换之比的关系。频响函数可用模态叠加法或傅里叶变换法直接求得,表达式如下:

$$\mathbf{H}(\omega) = \frac{1}{(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C})} \quad (4)$$

有了结构频响函数的表达式后,可进一步推出结构的随机响应计算公式。结构的随机响应输出谱矩阵 $S_{yy}(\omega)$ 和输入谱矩阵 $S_{xx}(\omega)$ 有如下关系:

$$S_{yy}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)^* \cdot S_{xx}(\omega) \cdot \mathbf{H}(\omega)^T \quad (5)$$

式中上标 * 表示矩阵的共轭。

3 振动夹具计算结果和试验验证

3.1 振动夹具试验验证

为了获得振动夹具的固有频率,在 10~2 000 Hz 频率范围内,将以加速度 1g 的正弦扫描振动进行共振检查,相应的扫描率不能大于每分钟 1 个倍频程,并测得共振频率和相应的共振放大因数 Q 。夹具扫频试验安装及检测点图见图 5,扫频所得的频响函数如图 6 所示。

共振检查完成后,根据如图 2 所示产品的试验谱图进行随机试验,夹具和产品连接的加持处为检测点,检测点安装的三向加速度传感器布置如图 5 所示。记录检测点的随机振动响应功率谱和方均根值,并计算检测点处的正交性放大系数以及检测点之间的偏差百分比。

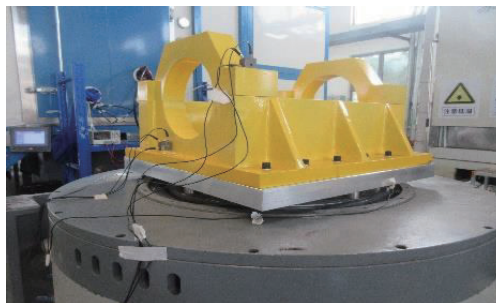


图 5 夹具扫频试验安装及检测点图

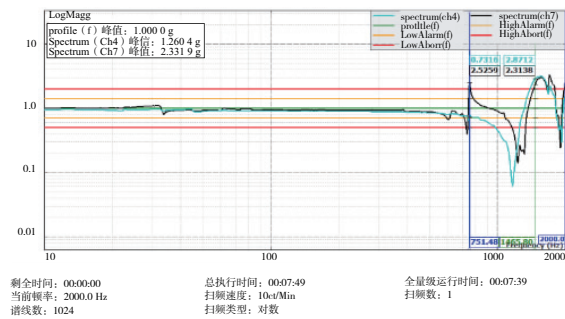


图6 试验测得的夹具频响函数

3.2 振动夹具固有频率的计算与试验结果对比

应用有限元软件 MSC/Nastran 对夹具建模和模态分析,得到振动夹具 2 000 Hz 以内的固有频率见表 1 第 2 列,前 4 阶模态振型如图 7 所示;而试验测得的固有频率列于第 3 列。振动夹具的第 1 阶测试固有频率为 751.48 Hz,是产品基频 279.85 Hz 的 2.69 倍,满足军标规定的 > 2 倍要求,并且与夹具计算值 771.19 Hz 相差仅 -2.62%。另外,由计算可知:在 1 000 Hz 以下少于 3 个共振峰,在振动试验频段 1 000~2 000 Hz 内有 6 阶模态,除去左右对称模态,不多于 5 个共振峰,符合对夹具结构固有频率的要求。

表 1 夹具固有频率的计算和试验结果 单位:Hz

阶数	计算值	试验值
1	771.19	—
2	875.75	—
3	1 280.8	—
4	1 378.4	—
5	1 398.7	—
6	1 609.6	有
7	1 728.6	—
8	1 829.0	有
9	1 910.7	—

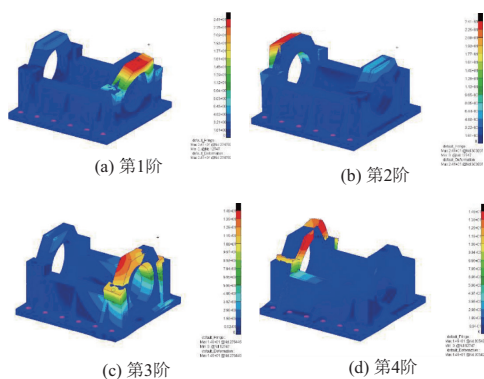


图7 夹具前 4 阶模态振型

3.3 振动夹具频响和随机响应的计算和试验结果对比

采用大质量法模拟振动台激励,进一步计算振动夹具的传递特性。按产品随机振动功率谱对振动夹具 y 向激励,计算夹具上 4 个检测点 3 个方向的随机振动加速度方均根值,然后分别计算 4 个检测点 x 和 z 向加速度方均根值与 y 向的比值以及 4 个测点 y 向加速度方均根值的偏差百分比,并将 4 检测点的平均值列于表 2 的第 3 行,试验结果则列于第 2 行。

表 2 夹具检测点处的正交性运动系数及相对误差

类别	放大因数 Q	正交性放大系数	偏差百分比/%
试验值	2.53	0.10 / 0.19	4.60
计算值	—	0.32 / 0.58	6.78

结果显示:夹具第一个共振峰处的放大因子 Q 为 2.53, < 6 倍要求。x 向和 z 向的正交性运动放大系数计算值分别为 0.32 和 0.58,试验值则分别为 0.10 和 0.19;检测点之间的相互偏差计算所得的 4 点平均值为 6.78%,试验值为 4.60%,满足振动夹具正交性运动放大系数及检测点之间的允许偏差的动态设计要求。

4 结语

本文依据振动夹具动特性的设计原则,开展了某导弹舱段振动夹具的设计和分析研究,设计了振动夹具的试验验证方案。试验结果表明:试验测试结果与理论分析结果吻合,该振动夹具的动态特性满足设计要求。

参考文献:

- [1] 程来,宋言明,杨洋. 机载装置的振动试验夹具设计[J]. 机械科学与技术,2012,31(6):910-914.
- [2] 钟继根,王东升. 振动试验夹具设计技术发展[J]. 振动与冲击,2006,25(8):1062-1064.
- [3] 胡志强. 随机振动试验应用技术[M]. 北京:中国计量出版社,1996:108-118.
- [4] 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.
- [5] 刘晓晨,陈坚,崔巍,等. 固体火箭发动机振动夹具设计及动态特性分析[J]. 强度与环境,2020,47(2):56-63.
- [6] 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.
- [7] 杭超,燕群,张昕. 细长偏心舱体振动试验夹具设计分析与验证[J]. 机械科学与技术,2019,38(2):322-328.
- [8] 史治宇. 变分原理及有限元[M]. 北京:国防工业出版社,2016.

收稿日期:2021-01-18