

某机载设备振动夹具设计及试验验证

王勇¹, 宁会峰¹, 杜尹学²

(1. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050;
2. 兰州万里航空机电有限责任公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要:根据某型飞行器直线作动机构振动试验条件以及振动试验夹具设计原则,以科学分析该型作动器外部结构和试验平台性能为前提,分别以整体铸造和螺接两种加工方式在三维软件 CATIA 中完成夹具的三维模型设计;采用 ANSYS 软件对模型进行模态分析和随机振动分析,得到夹具的固有频率及模态振型;依据仿真结果对比两种加工方式下夹具性能,选择整体铸造夹具为最终方案,并完成夹具实物加工与振动试验,试验结果验证了所设计夹具的可用性。

关键词:飞行器;振动夹具;模态分析;随机振动分析;振动试验

中图分类号:TG75; TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)04-0035-04

Structure Design and Test Verification of Vibration Fixture for Airborne Equipment

WANG Yong¹, NING Huifeng¹, DU Yinxue²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Lanzhou Wanli Aviation Electromechanical Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

Abstract: According to the vibration test conditions of a certain model of linear actuator of aircraft and the design principle of vibration test fixture, and based on the scientific analysis of the external structure of the actuator and its performance of the test platform, the two processing methods of integral casting and screwing are adopted to carry out the three-dimensional model design of the fixture by the three-dimensional software CATIA. ANSYS software is used to undertake modal analysis and random vibration analysis on the model to obtain the natural frequency and modal vibration mode of the fixture. On the basis of the simulation results, the fixture performances achieved by the two processing methods are compared, and the overall casting fixture is chosen as the final plan to conduct fixture processing and vibration test. The results verify the usability of the designed fixture.

Keywords: aircraft; vibration fixture; modal analysis; random vibration analysis; vibration test

0 引言

飞行器、舰船、车辆等运载工具上的设备都在多种复杂的环境下运行。以飞机上的设备(简称机载设备)为例,工况中存在着机械振动、冲击、噪声、低气压、盐雾等几十种环境因素,这些因素会缩短产品的使用期限并降低其可靠性^[1]。而其中的机械振动环境,由于其作用的持久性和所带来后果的严重性,加上本身具有的复杂性,使其成为运行条件中相当重要的一种使用环境^[2]。由于不能在现场对产品开展真实的振动测试,为保证产品后期的正常交付使用,模拟振动试验也就成为了一种评价结构是否达到预定功能和可靠性的有效方法。在进行振动试验时,被测试件常常通过振动夹具装夹到试验台面上,作为传递能量和信号的关键部件,其装夹的夹具性能会直接影响到试验结果的有效性和真实性^[3]。

传统设计多依靠经验或者根据实际试验结果对夹具进行多次返修,整个过程会造成人力和物力的不合理分配。本文根据某型号直线作动器(图1)的外形结构和实际使用时的安装及工作状态,从夹具的两种不同结构形式

出发,采用建模仿真与试验验证相结合的方式,设计了一款满足试验要求的振动夹具。

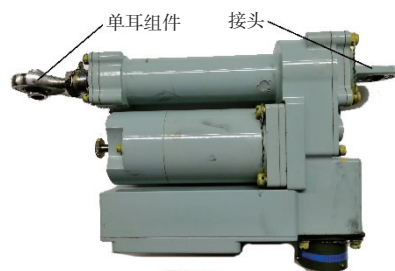


图1 某型号直线作动器

1 振动夹具的结构设计

1.1 设计原则及材料选取

在振动试验中,振动夹具的作用是将振动台的能量通过机械连接不失真地传递给试件,并尽可能保证试件上各个点的振幅与振动台一致。实际试验的情况中这一点很

难实现,只要传递误差在可允许范围内,则可认为夹具设计是合理的。试验结果是否具有可信度与夹具的设计、制造以及安装使用水平都是密不可分的^[4]。

夹具设计原则是在满足实际安装条件的前提下,尽可能具有低的质量和高的强度。结合夹具设计原则^[5],针对该型机载作动器,在设计时应考虑以下几点:

1) 夹具的1阶固有频率要尽量高于试验频率的最大值2000 Hz;夹具的响应特性要平坦,保证连接面上各点的响应尽可能一致,实现振动输入的均匀性。

2) 夹具的质量应该在4 kg~6 kg范围内。为减少试件对振动台的反共振,在不影响刚度和频率的条件下,最大限度地降低夹具质量。

3) 夹具的横向振动(垂直于激振方向的运动)应尽量小。

4) 结构选用质心低、对称形式,方便产品的安装以及与台面的连接,能正确模拟试件的实际边界条件。

5) 夹具共振时,其品质(放大)因数 ≤ 4 ,以保证夹具良好的振动传递特性。

为确保所设计夹具结构的合理性以及具有良好的动态性能,应该从夹具的刚度、质量、固有频率等特性参数方面进行研究。可从刚度 K 和质量 M 入手,来提高夹具的固有频率。因 K 正比于材料的弹性模量 E , M 正比于材料的密度 ρ ,因此应该尽可能提高 E/ρ 的值。目前常见的夹具材料^[6]物理特性如表1所示。

表1 夹具常用材料的物理特性参数

材料	弹性模量/(N/m ²)	密度/(kg/m ³)	比刚度/m
铝合金	7.0×10^{10}	$(2.5 \sim 2.8) \times 10^3$	$(2.5 \sim 2.8) \times 10^6$
钢	2.1×10^{11}	$(7.0 \sim 8.0) \times 10^3$	$(2.6 \sim 3.0) \times 10^6$
镁合金	5.0×10^{10}	1.71×10^3	2.92×10^6

从表1可以看出,镁、铝合金与钢的比刚度在数值上差别不是很大,从质量角度出发,铝合金密度较小,价格便宜,也更易于加工。因此本文夹具采用铝合金。

1.2 不同加工方式下的结构设计

根据产品规范中所要求的振动试验条件以及振动夹具设计原则,在分析该型作动器外部结构和试验平台性能的前提下进行了夹具结构的初始设计,拟采取两种设计方案,如图2所示。

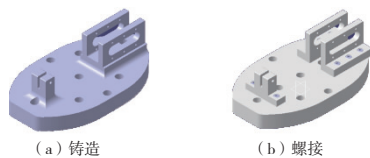


图2 铸造和螺接两种加工形式

方案一:整体结构铸造而成,底板上的沉头孔用于固定夹具在台面上,两处凸台部分用来固定产品的两端。一处作为作动器接头的安装位置,该处凸台的中间位置有长25 mm、宽6 mm、深度28 mm的槽,其尺寸由接头尺寸决定,安装时将接头放置在槽中,通过螺栓完成固定;第二处安装位置不仅要中间开槽,为保证试验过程中作动器能够

具有一个完整工作行程,还要考虑在两侧设计合理尺寸的滑槽。

方案二:夹具由独立的4部分通过螺钉安装到一起,其安装试件位置的尺寸与方案一相同,与方案一相比不仅有更好的通用性,加工周期也短。

为了避免金属间的直接摩擦,且有更好的支撑性,需要设计与滑槽尺寸相匹配的尼龙支撑套,通过螺钉与夹具完成装配,如图3所示。

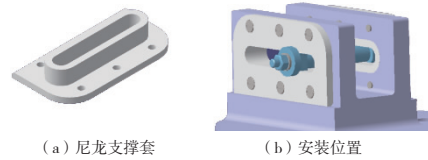


图3 尼龙支撑套及其安装位置

2 模态分析与随机振动分析

2.1 模态分析

在ANSYS Workbench中对夹具模型进行网格划分以及后续的仿真分析。所选材料为ZL101合金,其材料特性为: $E=7.0 \times 10^{10}$ N/m²;泊松比 $\mu=0.33$;密度 $\rho=2.68 \times 10^3$ kg/m³。方案一夹具的网格划分如图4所示,有限元模型选择四面体单元;对方案二的夹具结构进行同样操作。

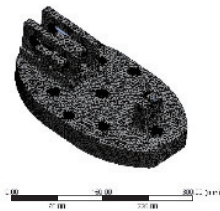


图4 夹具的网格划分

将ZL101合金的相关物理参数赋予模型。由于高阶模态的影响在产品实际工作中可以忽略不计,应重点考虑产品低阶模态对其振动响应的影响^[7]。通常分析前6阶模态就可以满足使用要求,两种加工方式下振动夹具的前6阶固有频率见表2,前2阶模态振型如图5、图6所示。

表2 前6阶固有频率 单位:Hz

阶次	方案一频率	方案二频率
1	2 219.1	1 872.8
2	2 239.8	1 873.4
3	3 982.9	3 586.9
4	4 018.6	3 587.4
5	5 175.9	4 490.2
6	5 252.5	4 494.2

整体铸造方式加工的夹具1阶固有频率2 219.1 Hz,高于试验要求的最高频率2 000 Hz;螺接形式下为1 872.8 Hz,这个频率在试验频率范围内可能会出现对输入谱的不确定放大。由于单耳组件安装位置处的尺寸较小,两种结构形

式下模态振型都表现为 y 方向上的摇摆,并且越靠近顶端其振动位移越大。考虑到后期装配使用时,由于单耳安装位置处销轴、轴套以及螺母的固定能够使得局部刚度变大,固有频率也会相应得到提升。通过求解总装结构的模态发现,其中铸造成型的夹具 1 阶固有频率变为 2 389.8 Hz,相较之下提高了 170.7 Hz;最大变形减小了 41.87%。

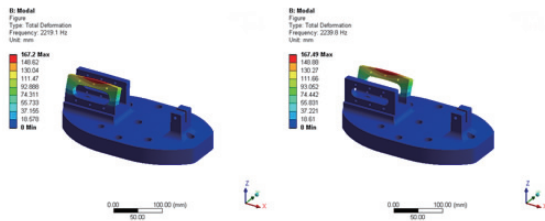


图 5 第 1 阶与第 2 阶模态振型(铸造)

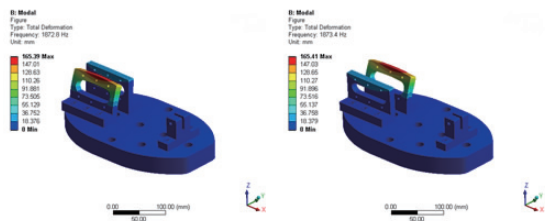


图 6 第 1 阶与第 2 阶模态振型(螺栓)

2.2 随机振动分析

随机振动分析是指以特定的功率谱密度(PSD)作为仿真分析的输入条件,最终计算响应特定值出现概率的一种分析方法,可用于在设计阶段通过随机振动仿真分析评估结构的动态特性^[8]。振动试验由功能试验和耐久试验两部分组成。以功能试验谱为例,试验图谱如图 7 所示,量值见表 3。经计算得加速度方均根理论值为 4.949g。

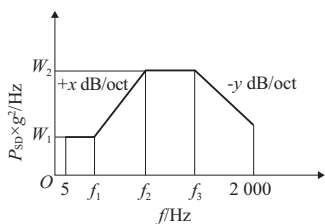


图 7 振动试验谱

表 3 振动试验量值表

参数	W_1	W_2	f_1	f_2	f_3	+x	+y
量值	0.005	0.05	30	100	300	6	6

加载如图 7 所示的激励谱,观察夹具 3 个方向的变形;选取安装位置处 A 点,如图 8 所示,看该点响应在要求频率范围内的振动是否平稳,对振动量级的放大效果是否在允许范围内。

表 4 为响应点 A 的 3 方向方均根值。从表 4 可看出,两种形式下的响应方均根值均在理论值附近。将铸造加工时 A 点 3 个方向响应谱的方均根值与理论值(4.949g)

相比误差更小,但响应点处的方均根值并不能直接表征传递特性的优异程度,还应结合该点输出的功率谱密度。通过比较两种加工方式下 A 点的 3 方向响应谱得出:铸造加工形式下,该点的 3 方向响应谱型更具有有一致性,说明其振动输出的均匀性较好,而且越靠近频率中段,夹具的传递特性越好;当夹具为螺栓形式时,A 点的 3 方向响应谱均出现了不同程度的失真,尤其在试验频率中段,这是由于螺栓连接不能很好地限制各部件之间的相对运动。因此,在没有装夹被测试件的情况下,铸造形式的夹具能够做到将振动激励平稳、不失真地传递给试件。

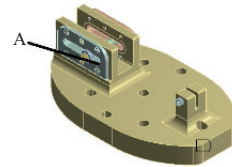


图 8 响应点选取

表 4 响应点 A 的 3 方向方均根值

方向	铸造	螺栓
x	4.993 6g	4.808 1g
y	4.965 8g	5.105 8g
z	5.043 8g	4.787 5g

铸造加工时,在随机载荷下变形最大为 0.001 2 mm,最大应力出现在输出端销轴中间位置,3 σ 应力大小为 1.62 MPa,说明在随机振动中材料所受的最大应力 > 1.62 MPa 的概率为 0.27%,远小于材料的屈服极限 355 MPa,夹具强度安全裕量较大,结构满足振动要求。响应加速度最大值 17.12g,与功率谱密度的方均根理论值($A_0=4.949g$)比值约为 3.46,品质因数 $Q < 4$,夹具设计也符合传递要求。

比较加速度响应谱还可以发现,螺栓形式的夹具 A 点处 3 个方向的响应谱在频率 1 800 Hz 附近时均出现了输入不同程度的放大,最大值为 67.563g,远超了规定的品质因数要求。由于模态振型表现为该方向上的摆动,螺栓连接很难限制各部件间的相对运动,容易造成波形出现“毛刺”畸变。若存在工期限制或其他原因必须采取螺栓形式的夹具,则可从配合面的精度等级和连接部分螺栓的预紧力两个方面来改善其传递性能。

通过对比仿真结果可看出,铸造形式的夹具结构动态特性优于螺栓,强度也满足使用要求。结合车间的加工水平,选定以铸造完成夹具的加工。

3 加工与试验

加工组装完成的夹具如图 9 所示。整体结构呈对称形式,其 3 个方向上的最大尺寸为 316 mm × 195 mm × 107 mm;夹具质量 5.66 kg,质心在竖直方向 24.083 mm 处,靠近振动台面。

夹具加工完成后,通过分布在安装面上的沉头螺栓实现与振动台面之间的固定,并保证夹具底面与振动台面的良好接触,将被测作动器安装到夹具上,如图 10 所示。



图9 组装完成的振动夹具



图10 y轴振动试验安装图

根据该机载作动器的技术要求在某电动试验台完成试验,通过安装在试件上的加速度计传感器反馈的功率谱密度验证夹具设计的合理性。图11所示绿色直线为理论谱线,蓝色持续振荡的为响应谱线。从图中可看出夹具在试验频率范围内能够真实模拟试件的边界条件并平稳地传递振动信号,对振动量级的放大效果在 $\pm 2\sigma$ 范围内,同时响应谱的加速度方均根为 $4.969g$,与理论值误差为 0.40% ,夹具满足使用要求^[9](本刊为黑白印刷,相关疑问可咨询作者)。

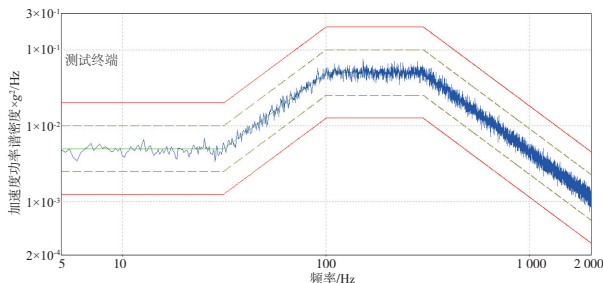


图11 响应点处的功率谱密度

4 结语

本文针对某机载作动器的边界和试验条件完成了夹具的建模,基于有限元仿真结果加工了夹具实物,随后进行作动器的振动试验,得出以下结论:

1)在工期不受限制及结构允许时,小型直线作动机构的夹具可优先采用整体铸造形式,其传递特性优于焊接;

2)通过有限元仿真可在振动夹具设计过程中评估其动态特性,实际的试验结果也验证了该方法的科学性与真实性;

3)本文所设计的专用振动夹具,其质量靠近约束范围的上限值,而且底板的刚度余量充足,可在以后同类型夹具设计时引入优化方法获得相关尺寸的最优组合。

参考文献:

- [1] 张阿舟. 振动环境工程[M]. 北京:航空工业出版社,1986.
- [2] 邵闯,方可强. 静载作用下的飞机结构振动试验研究[J]. 机械科学与技术,2009,28(11):1505-1508,1513.
- [3] 马爱军,刘洪英,董睿,等. 振动试验条件在夹具动态特性设计中的考虑[J]. 航天器环境工程,2013,30(1):78-81.
- [4] 尚村,李响. 某产品振动夹具的设计及结构优化[J]. 装备制造技术,2014(11):62-64,67.
- [5] 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.
- [6] 焦春旺,张杰. 电子产品大型机柜振动夹具设计及振动试验控制[J]. 电子机械工程,2016,32(2):35-38.
- [7] 黄健,林述温,林航. 基于模态分析的动臂固有频率预测模型[J]. 机械制造与自动化,2019,48(4):100-102,115.
- [8] 刘阳,熊望娥,申维娜,等. 基于ANSYS的某航天光学指向摆镜系统的随机振动分析[J]. 机械设计与制造,2010(4):18-20.
- [9] 周金林,付晨晖,刘旭琳. 振动试验夹具设计方法研究[J]. 装备环境工程,2012,9(6):135-139.

收稿日期:2021-03-09

(上接第22页)

转台整体封闭式结构以及转台轴承和力矩电机的应用,极大地提高了测量装置的稳定性和机械回转精度。利用磁阻传感器位置控制系统实现测量时零件的位置控制,达到扩展测量机功能、提高测量效率的目的。该转台不但能满足常规零件的测量,同时可测量具有复杂外形结构的零件,面向零件测量领域具有一定的推广实用价值。

参考文献:

- [1] 张露. 三坐标测量机在产品质量检测中的应用[D]. 长春:长春工业大学,2017.
- [2] 宋爱利,庞敏,宋慧,等. 基于三坐标测量机的渐开线齿轮测量方法[J]. 金属加工(冷加工),2020(5):77-80.
- [3] 杨新建. 智能三坐标测量机检测规划问题的研究[J]. 计量与测试技术,2017,44(8):57-58.
- [4] 欧阳婷婷,刘延平,彭江涛,等. 基于三坐标测量机的曲面轮廓度坐标测量技术[J]. 航天制造技术,2020(2):4-8.

- [5] 屈力刚,胡宝慧,李静. 基于三坐标测量机的规则曲面采样策略研究[J]. 机床与液压,2020,48(2):35-39.
- [6] 刘涛,吴军,王霞琴,等. 复杂三维曲面涡旋零件的精度检测[J]. 机械制造,2014,52(8):78-80.
- [7] 张占锋,李太林,周永东. 一种数控回转工作台的消隙机构[J]. 机械制造,2015,53(9):18-20.
- [8] 苏芬平,崔伟. 高精度转台的分析与设计[J]. 传感器世界,2018,24(7):19-24.
- [9] 樊凯强. 精密伺服转台控制系统研究[D]. 太原:中北大学,2017.
- [10] 黄少楚,冯晓明,卢丽卿,等. 基于各向异性磁阻传感器灵敏度与分辨率的探讨[J]. 大学物理实验,2018,31(4):9-12.
- [11] 徐照平,常思勤,施昕昕,等. 基于磁阻原理的高速直线运动位移测量系统[J]. 仪表技术与传感器,2009(3):89-91.
- [12] 黄兴,蔡潇,闫秀峰. 某舰载伺服转台动力学仿真分析[J]. 舰船电子对抗,2018,41(6):67-70.

收稿日期:2021-03-25