

## 振动试验夹具设计与实践

于韶明, 卫国, 杨峰, 都京  
(北京强度环境研究所, 北京 100076)

**摘要:** **目的** 探讨振动试验中夹具设计需要考虑的问题以及如何使得振动夹具满足试验要求。**方法** 详细了解了夹具设计的方法, 从外形和质量的角分析夹具的静态设计; 从刚度和阻尼的角度分析夹具的动强度设计。**结果** 支板试验的夹具改进提高了夹具的刚度; 导管试验的夹具改进提高了夹具的阻尼, 经过改进的夹具都顺利地完成了试验。**结论** 试验夹具的设计是一个系统工作, 需要综合考虑很多问题, 设计者可以通过选择比刚度高的材料降低夹具质量; 通过增加厚度提高夹具刚度; 通过增加螺纹连接提高夹具阻尼。

**关键词:** 夹具; 刚度; 阻尼

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2014.02.016

**中图分类号:** O329 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2014)02-0081-06

## Fixture Design and Practice for Vibration Test

YU Shao-ming, WEI Guo, YANG Feng, DU Jing

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

**ABSTRACT: Objective** To discuss several aspects in vibration fixture design and how to make the fixture satisfy the requirements of the tests. **Methods** Some design methods were introduced in detail, including the design in static state on shape and weight, as well as in vibration strength on rigidity and damping. **Results** Improvements on fixture increased its rigidity in the plate test and increased its damping in the pipe test. Fixture design is a systematic work which needs comprehensive consideration. **Conclusion** Designers can choose those materials with high specific stiffness to decrease the weight of fixtures, increase the thickness of fixtures to get higher rigidity, and add threaded connections to get higher damping.

**KEY WORDS:** fixture; rigidity; damping

随着科技的发展,特别是航天航空、机械制造等行业的发展,振动问题成为无法绕开的问题。由于设备能力越来越强,制造越来越精细,环境也越来越

复杂,想从理论上完全解决振动问题非常困难;同时随着振动设备的改进,控制方法的完善<sup>[1-2]</sup>,振动试验能力越来越强,例如北京强度环境研究所已经成

收稿日期: 2013-12-16; 修订日期: 2013-01-09

**Received:** 2013-12-16; **Revised:** 2013-01-09

**作者简介:** 于韶明(1986—),男,硕士,主要研究方向为振动试验。

**Biography:** YU Shao-ming(1986—), Male, Master, Research focus:vibration test.

功研制了双台 70 t 推力振动系统<sup>[3]</sup>。目前不仅需要通过振动试验模拟复杂的振动环境,还需要通过筛选振动试验剔除早期产品工艺和元器件缺陷<sup>[4-6]</sup>。因此振动试验被越来越普遍地采用,同时也发挥着越来越重要的作用<sup>[7]</sup>。

进行振动试验,离不开振动夹具;振动夹具是振动试验中一个重要的环节,关系到试验的成败、试验结果的可信程度等<sup>[8]</sup>。夹具的设计是振动试验的关键步骤,文中主要从静态设计、动强度设计两方面探讨夹具的设计方法以及注意问题,然后通过两个具体的试验探讨一些夹具设计的问题与技巧。

夹具的作用是将动圈的振动传到试件上<sup>[9-11]</sup>,因此夹具主要包括两个功能,固定产品与传递振动。评价夹具设计主要包括两个方面:固定产品的方便性与可靠性、振动的传递特性。

固定产品主要从静态的角度考虑,将在下一节中具体讨论;而传递振动主要从动强度的角度分析,将在第2节中分析讨论。

## 1 夹具的静态设计

夹具的静态设计,首先要满足将产品固定在台面上的要求,同时还应保证安装产品后不超出振动台的推力范围。

### 1.1 夹具的外形设计

夹具的外形是夹具设计最直观、最基本的要素,也最能体现一个设计者考虑问题的全面性,因为夹具的外形涉及到很多方面,以下列举了其中主要的6项。

1) 与台面的连接。这是夹具设计应该最先考虑的问题,一般试验都是多个方向的,夹具设计要考虑各个方向的安装,多数情况要考虑垂台、滑台等多个状态的安装。同时,应该注意不同振动台的规格尺寸,有些振动台尺寸是英制的,有些振动台的尺寸是公制的,这些都是设计者要考虑的。

2) 传感器的粘贴。振动试验少不了传感器的安装,夹具设计时就应考虑传感器安装的方便性。如果不考虑这个,很有可能夹具设计好后,却无法粘贴传感器,影响试验的顺利进行。

3) 安装方便。夹具的设计,不仅要能满足产品

与振动台的连接,而且要方便产品与振动台的连接,好的夹具,能使安装事半功倍,而不好的夹具会给安装带来很多不必要的麻烦。夹具设计需要提前考虑安装方法,比如扳手等是否能自由活动、夹具加工误差引起的安装困难等。

4) 吊装方便。随着振动试验能力的提升,振动产品也越来越大、越来越重,产品的安装往往需要吊车等设备的帮助,这就要求夹具设计时要考虑如何吊装。吊装的设计需要考虑产品、夹具的重心,保证吊装过程的安全。对于特别复杂的产品夹具,还应考虑吊车的吊带,以免吊装过程中,吊带与产品或夹具干涉。

5) 特殊要求,隔磁、预留电缆通道等。对于特殊的产品、试件,可能会有特殊的要求,例如隔磁要求、预留电缆通道的要求等,这些都应该在夹具设计时认真考虑。

6) 夹具的通用性。夹具的生产加工,不仅耗时耗力,而且需要材料与经济投入,如果一个夹具能满足多个要求,就应尽量少地生产夹具。夹具的通用性是一个夹具设计者经验的体现,反映了设计者的设计水平。

### 1.2 夹具的质量设计

要完成一个振动试验,首先需要振动台的推力满足要求。振动台的推力是一定的,要想做更重的产品试验,夹具的质量就需要设计得尽量小,从而达到搭载更重产品的要求<sup>[12]</sup>。

以航天希尔公司 MPA3324/H1248 电动振动试验系统为例,参数为:额定正弦推力 98 kN;额定频率 2~2500 Hz;额定位移 76 mm;额定速度 2 m/s;额定加速度 981 m/s<sup>2</sup>;最大负载 1100 kg。另外几个质量参数为:动圈 85 kg;滑台 140 kg;动圈与滑台连接夹具(俗称牛头) 20 kg。

振动台的推力 98 kN 是指所有振动结构的总质量乘以加速度的最大值,见式(1):

$$F = (m_{\text{产品}} + m_{\text{夹具}} + m_{\text{滑台}} + m_{\text{动圈}} + \dots)a \quad (1)$$

式中: $F$ 代表试验推力; $(m_{\text{产品}}+m_{\text{夹具}}+m_{\text{滑台}}+m_{\text{动圈}}+\dots)$ 代表振动结构的总质量; $a$ 代表试验的振动量级。

比如做加速度为 10g 的试验,所有振动结构(包括动圈、夹具、产品,如果用滑台还需加上滑台、牛头)的总质量最大为 1 t,在动圈、滑台、牛头无法改变

的情况下,如果产品质量大,就只能通过减少夹具质量来实现了。在有限条件下,做高量级的试验,而且需要保证试验精度,需要夹具设计者充分考虑,设计出满足传递要求而又不重的夹具。

## 2 夹具的动强度设计

振动夹具是用来连接产品与振动台,进行振动试验的,区别于静力试验。振动夹具更注重振动的传递,能不能把振动台的振动有效地传递给产品是振动夹具合适与否的关键。而振动夹具的传递特性主要由其刚度与阻尼决定,本节从这两个方面讨论夹具的动强度设计。

### 2.1 夹具的刚度设计

振动试验中,希望将动圈的振动不失真地传递给产品。夹具是动圈与产品的连接装置,是不能看作刚体的,特别是高于100 Hz以后,夹具的谐振频率也会对产品的响应有所影响。既然夹具不能看作刚体,只能作为弹性体进行分析。对于弹性体,采用有限元法对其进行分析<sup>[13]</sup>,如式(2):

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

式中: $\omega = 2\pi F$ 为夹具的谐振角频率; $\mathbf{K}$ 为夹具的刚度矩阵; $\mathbf{M}$ 为夹具质量矩阵。

理想情况下,夹具的一阶谐振频率应该大于产品一阶谐振频率的2倍,最好是远大于产品的谐振

频率,因此需要尽量增加夹具的刚度。提高夹具刚度,需要选取刚度大的材料,而刚度大的材料一般密度大,会增加夹具质量。通过式(2)可以粗略地看出,要想提高夹具的谐振频率,需要的不仅仅是提高刚度,而是提高 $\mathbf{KM}^{-1}$ 。

为了更好地验证材料对谐振频率的影响,建立了有限元模型,进行有限元分析。如图1所示,模型为一个圆柱连接了一个方板、一个圆板,并有四个加强筋;边界条件为圆板上的四个孔固支,其它边界自由。同一个结构,分别选取铝、钢等材料计算结构的模态频率。

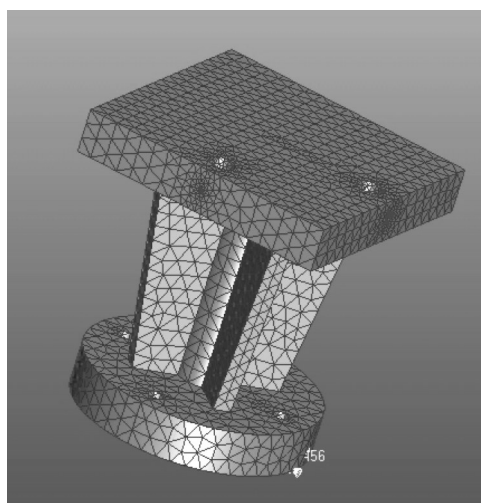


图1 谐振频率验证有限元模型

Fig.1 The finite element model of validation test

表1 常用夹具材料的主要物理特性

Table 1 Main parameters of common fixture materials

材料	杨氏模量 $E/(\text{N}\cdot\text{cm}^{-2})$	密度 $(\text{N}\cdot\text{cm}^{-3})$	比刚度/cm	热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	声速/ $(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$
铝	$7.0 \times 10^6$	$(2.5 \sim 2.8) \times 10^{-2}$	$(2.5 \sim 2.8) \times 10^8$	$24 \times 10^6$	5.11 ~ 5.33
钢	$2.1 \times 10^7$	$(7 \sim 8) \times 10^{-2}$	$(2.6 \sim 3) \times 10^8$	$18 \times 10^6$	5.05 ~ 5.13
铍	$3.0 \times 10^7$	$1.85 \times 10^{-2}$	$1.6 \times 10^9$	$12 \times 10^6$	12.6
镁	$5.0 \times 10^6$	$1.71 \times 10^{-2}$	$2.92 \times 10^8$		4.60 ~ 4.90

有限元结果显示,采用材料钢与铝进行计算,两种材料的各阶频率十分相近,两种材料的各阶振型也很接近。这充分说明影响模态的不仅仅是强度,还有材料的质量等参数。综合考虑,选取比刚度(模

量/密度)这个参数比单独选取刚度这个参数能更好地描述材料是否适合做夹具<sup>[14]</sup>。表1列出了常用夹具材料的主要物理性能<sup>[15]</sup>。从表1看出铝与钢的比刚度很接近,这很好地解释了前面的有限元计算结果。

因此,设计夹具时,为了满足振动夹具的刚度要求,应该尽量选取比刚度大的材料。另外,从机械加工的角度考虑,特别是小夹具。镁合金的加工最快最容易,镁的切削速度比铝的快20%,是钢的3倍。从效率与阻尼等角度,镁合金是做夹具的理想材料。

## 2.2 夹具的阻尼设计

振动过程中,产品除受恢复力的作用外,还受到阻力的作用。振动过程中的阻力称为阻尼。产生阻尼的因素比较多,例如物块在导轨或接触面上运动,会产生库伦阻尼;在流体介质中运动时,会产生介质的黏性阻尼<sup>[16]</sup>。

振动试验中为了能很好地控制试验,使得控制谱在允差以内,振动的夹具、夹具应该采用阻尼大的材料。镁合金阻尼性能最好,因此一些通用夹具以及滑台、牛头等一般都采用镁合金材料。

另外,夹具的设计要求夹具的一阶谐振频率要大于产品的一阶谐振频率,而实际情况下,特别是较大、较薄夹具,谐振频率一般较低,很难满足要求。振动夹具设计中,如果夹具一阶频率无法达到远高于产品一阶频率时,可提高夹具阻尼来降低对产品的影响。提高夹具阻尼的方法,包括加硅油、增加螺栓连接等方法。下面介绍螺栓连接提高阻尼的方法。

螺纹是通过斜面原理,围绕圆柱以较小的倾斜面(线圈)缠绕,并沿着该斜面制作成突起的线圈,该缠绕着突起线圈的圆柱称为螺纹。如图2所示。

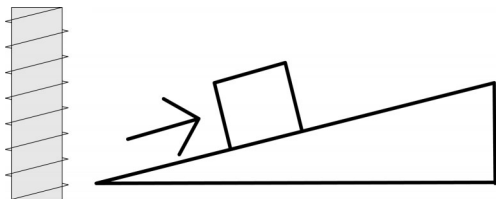


图2 螺纹工作原理示意

Fig.2 Schematic diagram of thread

对于摩擦力,螺纹线圈与普通斜面类似,都是将压力转换成了摩擦力。通过螺纹,把螺柱的预紧力转化成了螺柱与螺母的摩擦力,达到固定夹具跟产品的效果。

因此,螺纹连接对夹具或产品的固定是通过摩擦力(主要是静摩擦力)实现的,摩擦力的方向是与相对运动(或相对运动趋势)方向相反的,这正好与阻尼

的效果相同。通过增加螺纹连接可以增加系统的阻尼。

## 3 试验实践

在具体试验实践中,对夹具的要求是多种多样的,笔者仅挑选两项设计改进进行简单的探讨,分别对应提高夹具刚度以及提高夹具阻尼的情况。

### 3.1 支板试验

在支板试验过程中,需要对一个有12个突起的圆形支板做振动试验。试验频率区间为20~2000 Hz,产品直径约为600 mm。

试验原采用夹具如图3所示,夹具上有12个槽,正好安装支板的12个突起,然后通过外圈的孔与通用夹具连接。试验发现产品响应过高,夹具的刚度不满足要求。

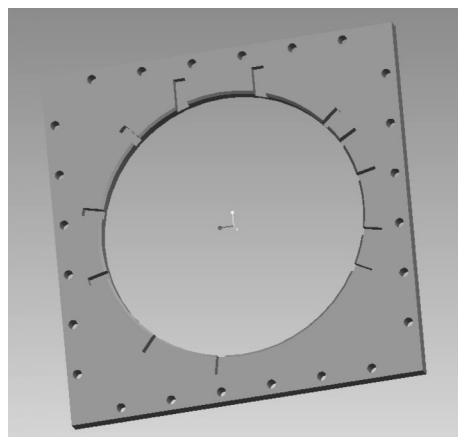


图3 支板试验改进前夹具

Fig.3 The fixture for plate test before improvement

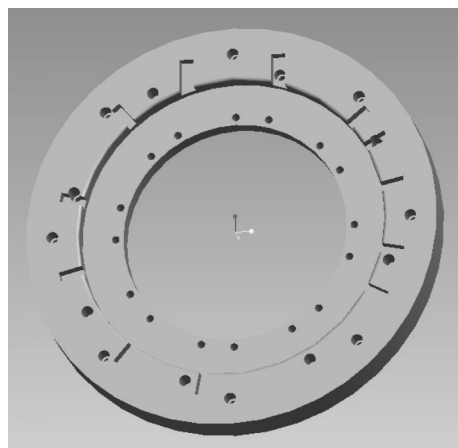


图4 支板试验改进后夹具

Fig.4 The fixture for plate test after improvement



分析原因,主要是夹具的刚度不足,夹具的谐振频率太低。另外夹具不能与振动台直接连接,需要通过通用转接夹具转换,使得传递特性较差。为了满足试验要求,重新设计夹具,修改后夹具如图4所示。夹具厚度从30 mm变为了60 mm,增强了刚度;连接孔设计成与振动台动圈直接相连。采用有限元法计算改进后夹具的模态,如图5所示。改后夹具模态一阶谐振频率已经达到1729.4 Hz,能够满足要求,最终顺利完成试验。

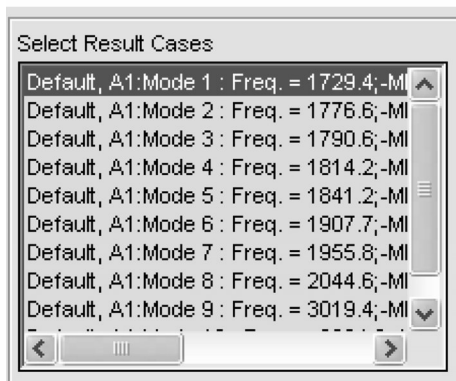
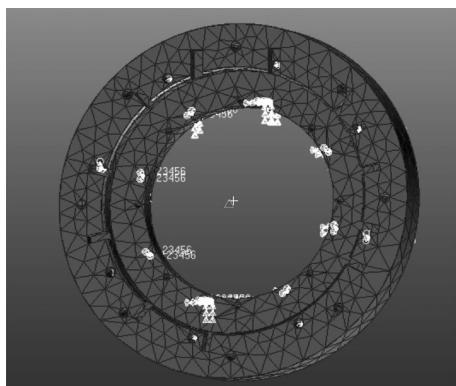


图5 支板试验改进后夹具模态分析

Fig.5 Modal analysis of the fixture for plate test after improvement

### 3.2 导管试验

导管试验主要是考核管路,如图6所示。管路的两端分别连接在一个圆筒的壁与圆筒中央。试验复杂的地方在于需要管路的两端都能达到各自的目标量级,同时又不希望任何一端超过目标量级太多。

采用图6所示的夹具进行振动试验,按照筒壁振动条件进行控制,结果筒中央谐振频率偏低。这对管路的影响很大,如果试验坚持进行,很有可能使得管路过度考核而破坏。为了满足试验要求,需要

修改夹具,考虑到如果一味增强连接刚度,可能会使得谐振峰功率谱密度降低,而未必能达到提高谐振频率的目标。因此,以增加螺纹连接的方式提高连接的阻尼,设计了图7所示的夹具,增加4个加强筋,不过4个筋的两端都是螺纹连接而非焊接。改进后的夹具使得筒中央的谐振峰不是很高,在可接受范围内,最终顺利完成试验。



图6 导管试验改进前夹具

Fig.6 The fixture for pipe test before improvement



图7 导管试验改进后夹具

Fig.7 The fixture for pipe test after improvement

## 4 结语

夹具的设计在振动试验中起到关键的作用,同时夹具的设计涉及到很多问题,包括安装、测量、振动传递等多个方面,需要考虑的问题也很多。一个好的夹具,不仅仅能保证试验的顺利进行,同时能使试验事半功倍,提高效率。另外,夹具的设计对试验成本影响也很大。因此夹具的设计者在试验中扮演着重要的角色。设计者在设计过程中应多积累经验,以求设计出简单高效的振动夹具。

### 参考文献:

- [1] 黄波,张正平,李海波,等.力限振动试验技术进展综述

- [J].强度与环境,2012,39(5):18—27.  
HUANG Bo, ZHANG Zheng-ping, LI Hai-bo, et al. Overview on Research Progress of Force Limited Vibration Technolog [J]. Structure & Environment Engineering, 2012,39(5):18—27.
- [2] 卢兆明,王沈敏,史晓雯.振动试验的控制策略[J].环境技术,2010,4(2):5—10.  
LU Zhao-ming, WANG Shen-min, SHI Xiao-wen. Control Strategy for Vibration Test [J]. Environment Technology, 2010,4(2):5—10.
- [3] 国内最大推力振动试验系统应用于CZ-5火箭研制[J].生命科学仪器,2012,10(10):50.  
Domestic Vibration Test System with Maximum Thrust Successfully Applies on CZ-5 Rocket Development [J]. Life Science Instruments, 2012,10(10):50.
- [4] 刘杨,胡彦平,张正平.环境应力筛选及工程应用[J].强度与环境,2008,35(2):50—56.  
LIU Yang, HU Yan-ping, ZHANG Zheng-ping. Environment Stress Screen and Engineering Application [J]. Structure & Environment Engineering, 2008,35(2):50—56.
- [5] 张露,张熙川.环境应力筛选技术及其应用问题分析[J].装备环境工程,2006,3(4):62—65.  
ZHANG Lu, ZHANG Xi-chuan. Analysis of Environmental Stress Screening Application [J]. Equipment Environmental Engineering, 2006,3(4):62—65.
- [6] 韩维航.电子产品环境应力筛选试验[J].装备环境工程,2009,6(2):40—43.  
HAN Wei-hang. Environmental Stress Screening Test of Electronic Products [J]. Equipment Environmental Engineering, 2009,6(2):40—43.
- [7] 张正平.航天运载器力学环境工程技术发展回顾及展望[J].航天器环境工程,2008,25(3):233—236.  
ZHANG Zheng-ping. A Review of Studies on Dynamic Environments of Launch Vehicles [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008,25(3):233—236.
- [8] 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.  
ZHU Shu, CHANG Zhi-gang. Fixture Design Technology Research and Practice for Vibration and Shock Test [J]. Environment Technology, 2009(3):14—19.
- [9] 陈立伟,卫国.某振动台大型转接夹具设计与振动特性计算分析[J].强度与环境,2009,36(3):54—58.  
CHEN Li-wei, WEI Guo. Structure Design and Vibration Characteristic Analysis of Large Size Fixture for a Certain Shaker [J]. Structure & Environment Engineering, 2009,36(3):54—58.
- [10] 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—263.  
WU Rui-xuan. Study of Testing Method of Vibration Fixture [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010,7(6):252—263.
- [11] 夏江宁.振动试验夹具设计的疲劳分析[J].装备环境工程,2010,7(6):264—266.  
XIA Jiang-ning. Fatigue Analysis of Vibration Test Fixture [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010,7(6):264—266.
- [12] 王伟,李铁南.振动夹具设计技术研究[J].科技咨询导报,2007(11):10—11.  
WANG Wei, LI Tie-nan. Research on Vibration Fixture Design Technology [J]. Science and Technology Consulting Herald, 2007(11):10—11.
- [13] 王珂,孙妍妍,毛志颖.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—487.  
WANG Ke, SUN Yan-yan, MAO Zhi-ying. Comprehensive Optimization Method for Dynamic Design of Fixture of Vibration Test [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013,33(3):483—487.
- [14] 李朝锋,苏可鹏,朱琳.振动试验中常见问题的分析[J].环境技术,2012(4):11—14.  
LI Chao-feng, SU Ke-peng, ZHU Lin. Analysis on Common Problems in the Vibration Test [J]. Environment Technology, 2012(4):11—14.
- [15] 邢天虎.力学环境试验技术[M].西安:西安工业大学出版社,2003.  
XING Tian-hu. Dynamics Environment Test Techniques [M]. Xi'an: Xi'an Technological University Press, 2003.
- [16] 刘习军,贾启芳,张文德.工程振动与测试技术[M].天津:天津大学出版社,1999.  
LIU Xi-jun, JIA Qi-fang, ZHANG Wen-de. Engineering Vibration and Testing Technology [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999.