

振动试验夹具设计方法研究

周金林, 付晨晖, 刘旭琳

(中国兵器工业第二〇三研究所, 西安 710065)

摘要: 根据型号项目振动试验的实践经验,提出了振动试验夹具设计的基本要求、方法步骤以及制作过程中应注意的问题,讨论了各类夹具的应用范围,对于产品振动试验夹具设计工作具有重要的指导意义。

关键词: 振动试验; 夹具设计与制造; 振动特性

中图分类号: TG174.3; TG759 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)06-0135-05

Research on Design Method of Fixture for Vibration Test

ZHOU Jin-lin, FU Chen-hui, LIU Xu-lin

(No.203 Research Institute of China Ordnance Industries, Xi'an 710065, China)

Abstract: According to the practical experience of vibration test for model engineering project, the basic requirements, methods and procedures were put forward as well as the problems to be noticed in the manufacturing process of fixture design for vibration test. The application range of various fixtures was discussed. The purpose was to provide guidance for fixture design for vibration test.

Key words: vibration test; fixture design and manufacture; vibration characteristic

进行正弦振动试验和随机振动试验时,首先应将试件牢牢固定在振动台台面上,通常情况下必须借助于夹具。根据有关标准要求,在振动试验中必须进行 x, y, z 共3个方向的振动试验考核,这样试件则需要多个方向的固定。因此,夹具设计显得非常重要,整个振动试验的成功与否、试验结果的可信度与试验夹具设计、制作及安装水平密切相关。如果夹具选择不合适,会使试件受到的振动环境产生失真,也可能影响振动控制,使有些地方超差严重,甚至使试验难以进

行。因此,应考虑试验件的质量、尺寸及结构等因素,对试验夹具提出具体的设计要求和验收标准^[1]。一般情况下随机振动试验比正弦振动试验对夹具设计和制造的要求更高也更为严格^[2-3]。目前,我国尚未制定出对于夹具要求的标准。

1 常用振动试验夹具的种类与应用

由于试验要求不同,设计的振动试验夹具种类

收稿日期: 2012-08-05

作者简介: 周金林(1962—),男,陕西眉县人,高级工程师,研究方向为型号项目可靠性工程。

有很多,一般可分为专用和通用两种。专门为某个或某种类型试件设计的夹具称为专用夹具;用于多个不同试件的夹具称为通用夹具。文中主要分析、研究通用夹具的种类及应用情况。

1) 螺接类夹具。螺接夹具通用性好,且连接方便,一般可有多种组合,但螺接类夹具传递特性较差,只适合于小试件或低加速度量值情况下使用。

2) 板状夹具。板状夹具包括直径与振动台面等大或略大的圆型或矩形、带T形槽的转接板及台面扩大并高出台面的转接板。板状夹具比较容易与试件连接,其上可安装多个小夹具以增加试件数量,提高试验效率。台面扩大转接板一般用于尺寸超过台面的试件和综合试验。

3) T形夹具或直角夹具。T形夹具和直角夹具类似,均为对称结构,适用于试件多轴向试验,可在垂直板两侧同时安装两个试件,保证夹具和试件的联合质心与振动台台面的中心轴线在一条直线上。T形夹具或直角夹具的优点是刚度大、振动稳定性好、试件变方向时装卸方便。

4) 锥形夹具。锥形夹具采用肋状结构,锥形截面和宽厚的筋形可增加刚度与质量比。一般经铸造生产工艺制作,振动频率较低时也可以采用焊接成型工艺。锥形夹具可以增大安装试件的台面面积,适用于大型试件或者较大且细长的试件。

5) 桁架式夹具。桁架式夹具也称笼式夹具,适合于尺寸、质量特大的试件。桁架式夹具用薄壁大口径圆管焊接而成,圆管内可填充聚氨酯泡沫作为阻尼材料。桁架式夹具最高尺寸可以达到3.3 m。在使用桁架式夹具之前,必须加上模拟负载进行传递特性测量,试件安装点符合要求后,方可进行正式试验。

6) 其它夹具。除以上介绍的几种振动试验夹具以外,还有立方体夹具、封闭盒形夹具、开口盒形夹具及圆筒形夹具等,都具有较好的动力特性,而且制作简单方便,可用于小型零构件的振动试验。

2 振动试验夹具的设计

在进行夹具设计过程中,一般情况下振动台与夹具的连接比较简单。因试件的种类及结构不同,使试件和夹具的连接比较复杂,而且由于不同类型试件有不同的动力特性,试验中对夹具安装及连接

的要求也不相同。因此,一个符合要求的夹具设计应该由具体完成振动试验的工程技术人员和负责产品设计的人员合作完成。

试验夹具的功用是将振动台的运动和能量传递给试件。在进行振动试验时人们通常希望振动台的动圈将振动能量不失真地传递到台面,再通过夹具施加到试件上,即认为振动台动圈和试验夹具都是刚体。试验过程中如果振动台动圈或试验夹具发生共振,输入将无法保持与输出相同的量值,而且夹具上各个点的振动参数也无法保持相同的量值,从而对试验件产生了影响^[4]。经过几十年的研究和改进,振动台的动圈已达到了刚度大、质量小的要求,其机械谐振频率一般都超过了2000 Hz,小推力振动台已经达到4000 Hz以上。夹具由于材料、结构以及被试件的千变万化,机械谐振频率一般很难达到振动台动圈的水平,只有在100 Hz以下较低的振动频率时,才能将夹具视为“刚体”。可以通过试验来比较两个夹具的优劣,但不能明确给出哪个夹具合格或不合格的结论。分析、研究夹具的动力特性是一项非常复杂的工作,尤其是大型试验夹具,很难准确计算出频响特性。振动试验之前,必须加上模拟负载,通过正弦扫频振动和宽带随机振动等试验来测试其动力特性,以保证夹具的传递特性符合试验要求。

2.1 振动夹具设计要求

在振动试验时夹具的主要作用是连接或固定试件,并传递振动控制参数,同时固定或改变振动方向。夹具的种类很多,有专用和通用之分。对夹具设计的基本要求如下。

1) 设计应便于试件安装,尽可能接近产品实际受力情况,且能方便地与振动台台面连接。

2) 为控制振动试验系统的质量,保证所能达到的最大加速度量值,夹具质量应尽可能小。

3) 设计方案要考虑夹具加工方便、工艺性好,同时价格尽可能低,加工周期要短。

4) 夹具设计应对传递特性、允许的正交运动以及与试件连接各固定点之间的振动偏差进行限制。要考虑试件振动试验量值以及试件大小、质量的不同,设计合理的夹具。对于尺寸、质量越小的试件,一般要求越高,试验中也容易达到理想的标准要求^[5]。针对不同类型的试件,设计夹具的振动特性见表1。

表1 夹具振动特性

Table 1 The vibration characteristics of fixtures

试件质量	传递特性	允许的正交运动	固定点之间振动偏差
质量 5 kg 以下的机电设备	1) 1000 Hz 以下没有共振峰; 2) 1000 Hz 以上允许有 3 个共振峰, 3 dB 宽带 ≥ 100 Hz, 放大因子 ≤ 5 。	在 2000 Hz 以内, y 向、z 向的振动量值均小于 x 向。	1) 1000 Hz 以上允许振动偏差 $\pm 20\%$; 2) 1000 ~ 2000 Hz 允许振动偏差 $\pm 50\%$ 。
质量 5~25 kg 的机电设备	1) 800 Hz 以下没有共振峰; 2) 800~1500 Hz 允许有 4 个共振峰, 3 dB 宽带 ≥ 100 Hz; 3) 1500~2000 Hz 允许有 4 个共振峰, 3 dB 宽带 ≥ 125 Hz, 放大因子 ≤ 8 。	1) 在 100 Hz 以内, y 向、z 向的振动量值均小于 x 向; 2) 在 1000 Hz 以上振动量值均小于 2x 向; 3) 离开共振峰 200 Hz 以外的振动量值均小于 3x 向。	1) 1000 Hz 以下允许振动偏差 $\pm 30\%$; 2) 1000~2000 Hz 允许振动偏差 $\leq \pm 100\%$ 。
质量 25~250 kg 的机电设备	1) 500 Hz 以下没有共振峰; 2) 500~1000 Hz 允许有 2 个共振峰, 3 dB 宽带 ≥ 125 Hz, 放大因子 ≤ 6 ; 3) 1000~2000 Hz 允许有 3 个共振峰, 3 dB 宽带 ≥ 150 Hz, 放大因子 ≤ 8 。	1) 在 500 Hz 以内, y 向、z 向的振动量值均小于 x 向; 2) 在 500~1000 Hz 振动量值小于 2x 向; 3) 1000~2000 Hz 振动量值小于 2.5x, 离开共振峰 200 Hz 以外的振动量值均小于 3x 向。	1) 500 Hz 以下允许振动偏差 $\pm 50\%$; 2) 500~1000 Hz 允许振动偏差 $\leq \pm 100\%$; 3) 1000~2000 Hz 离开共振区 200 Hz 以外允许振动偏差 $\pm 200\%$ 。
质量 250 kg 以上的大型机电设备	1) 150 Hz 以下没有共振峰; 2) 150~300 Hz 允许有 1 个共振峰, 放大因子 ≤ 3 ; 3) 300~1000 Hz 允许有 3 个共振峰, 3 dB 宽带 ≥ 100 Hz, 放大因子 ≤ 5 ; 4) 1000~2000 Hz 允许有 5 个共振峰, 3 dB 宽带 ≥ 200 Hz, 放大因子 ≤ 10 。	1) 在 300 Hz 以内, y 向、z 向的振动量值均小于 1.5x 向; 2) 300~2000 Hz, y 向、z 向的振动量值小于 2.5x 向; 3) 300~1000 Hz 离开共振峰 100 Hz 以外的振动量值均小于 3.5x 向; 4) 1000~2000 Hz 离开共振峰 150 Hz 以外的振动量值均小于 4x 向。	1) 400 Hz 以下允许振动偏差 $\pm 50\%$; 2) 400~2000 Hz 允许振动偏差 $\pm 200\%$ 。

2.2 夹具设计的原则

1) 夹具设计首先要选择材料, 振动夹具的高频特性对其材料的强度和疲劳特性提出了较高的要求。夹具设计时应优先选用比刚度大、阻尼大的材料, 一般最常用的是铝、镁及其合金, 尽可能不要选用钢做夹具的材料。材料的比刚度大即夹具的质量小而刚度大, 可使振动试验影响变小且控制效果更好。

2) 设计时使夹具的质量尽可能小。根据强度理论 $f = \sqrt{k/m}$ 可以看出, 材料的固有频率 f 与刚度 k 成正比, 与质量 m 成反比。对同一尺寸的金属, 铝比镁质量大 1/3, 钢比镁质量大 4 倍。应防止因强度不

足, 导致夹具自身被振坏, 最终损坏试验产品的现象发生。

3) 夹具的总体结构设计应优先采用对称形式, 一般选择立方体、盒形、半球形和锥形。在振动试验过程中, 尽可能使试件和夹具的合成质心落在振动台的中心线上, 即“对中”。对于质心较高的试件或夹具, 夹具的平稳性能就更加重要, 可以避免振动台面摇晃振动带来的控制振动波形失真; 同时, 还特别关注夹具是否会产生横向运动, 甚至于旋转和滑移。

4) 在选择夹具的制造工艺时, 应尽量采用筒体、整体夹具, 一般优先采用整体铸造工艺, 其次可

以选用焊接和螺接工艺。

5) 在选择夹具的连接方式时,夹具与振动台台面连接孔必须做成埋头带台肩的孔。安装试件时必须采用螺纹衬套或钢丝螺套。

2.3 振动试验夹具设计的一般程序

1) 明确产品振动试验的要求,包括设计技术要求等。

2) 研究分析试件的振动试验条件,包括产品振动试验的量级和允许容差、总试验时间以及试件的实际安装要求、测试方案及方法等。

3) 了解试件的实际安装、固定情况。夹具设计应尽量接近试件实际安装,使试件连接点的受力最大限度符合预期使用状态,并保证不超过真实边界条件,不会造成过试验或欠试验情况的发生。

4) 根据振动台台面的连接螺孔或光孔的尺寸和位置,确定试验时试件、夹具与振动台台面的连接方式,同时考虑对 x, y, z 各轴采用一个夹具还是多个夹具。

5) 计算或参照有关规范指南以确定试件的振动响应特性值,粗略估计振动响应峰值频率,要保证夹具谐振频率和试件的固有频率不能重合。

6) 确定夹具总体设计方案,绘制夹具草图。粗略计算夹具的最低固有频率,保证其大于试件第一响应峰值频率的3~4倍。测试、分析夹具的传递特性、允许的正交运动以及试件与各固定点连接间的振动偏差,结果应符合表1的要求。不合适可以反复修改,直到满意为止。

7) 完成设计图样,交付加工制作,并对过程进行监督、指导。

3 振动试验夹具的制造

制造夹具的主要方法一般有整体机械加工、铸造、螺钉连接、焊接、粘接、环氧树脂成形等。在工程实践中,优先选择整体机械加工,除此以外可依次选择铸造、螺钉连接、焊接的制作方法。

1) 对于形状比较复杂的夹具一般采用铸造的方法制造,其中砂铸比压铸在铸造时更好,其粒度较粗,有利于减振,但铸造周期会长一些。一般情况下,铸造出的夹具经过加工、打磨后阻尼会变小。

2) 螺接夹具具有多种组合,且连接方便。夹具与振动台螺接时,每个螺栓承受的最大载荷见式(1)。

$$F=(m_1+m_2) \times a_{\max} / N \quad (1)$$

式中: m_1 为夹具的质量,kg; m_2 为试件的质量,kg; a_{\max} 为振动的加速度峰值, m/s^2 ;N为螺栓数; F 为每个螺栓承受的最大载荷力,N。

螺接夹具加工要求较高的精度,且配合面必须平整光洁,螺栓预紧力比预期振动产生的分离力至少大10%以上。根据研究分析,当2000 Hz高频振动试验时,较大夹具的螺栓间距不要超过8 cm。对于铝合金或铝镁合金,由于材料质地较软,连接用螺孔应采用粗牙螺纹,对提高夹具连接可靠性更为有利。

3) 夹具的制作过程中要对其振动特性进行分析计算,至少要保证试件一阶谐频和夹具一阶谐频之比在0.5~1.4之间。如果超出此范围,应采取增加材料阻尼等措施。设计应保证夹具振动加速度传递特性在-30~+20 dB之间。夹具的横向振动应尽量小,一般不得大于30%,至多不超过40%。

在夹具制作完成后必须采用正弦扫描试验来测量其动力特性。测试时应加上模拟负载,当夹具实测传动特性不符合试验要求时,必须对夹具设计进行修正。可以采取增加连接螺栓个数、增大螺栓预紧力、添加强筋、改善局部刚度等措施,直到满足试验要求。

4 结语

随着科学技术的发展,产品性能和功能的要求在不断提高,产品组成也随之复杂化,其环境试验要求也更加严酷,频率范围更宽、振动量值更大,对试验夹具提出了更高的要求。与此同时,振动环境的产生和测量的准确度在很大程度上与试验夹具及安装有关。振动试验夹具的好坏直接关系到试验的成败,夹具设计是一项复杂而重要的工作,既需要一定的理论知识,又需要丰富的实践经验。在收集、分析、研究有关资料的基础上,提出了振动试验夹具设计、制作的基本要求,可以指导产品振动试验夹具的设计工作。

参考文献:

- [1] 胡志强. 随机振动试验应用技术[M]. 北京:中国计量出版社, 1996:195—200.
- [2] 李蓓蓓. 振动分析的有效工具——功率谱密度[J]. 包装工程, 2004, 25(3):46—47.
- [3] 于君, 王洋, 焦新泉, 等. 基于冲击振动信号的响应谱分析研究[J]. 包装工程, 2008, 29(9):1—3.
- [4] 戴诗亮. 随机振动实验技术[M]. 北京:清华大学出版社, 1984:51—64.
- [5] 张阿舟. 振动环境工程[M]. 北京:航空工业出版社, 1986:86—102.

(上接第 130 页)

感器两端固定。当加载 1 个砝码时, 两凸台之间产生应力 $1000 \mu \varepsilon$, 依次叠加砝码可达到 $5000 \mu \varepsilon$ 。

4 关键部位模拟试验模块

关键部位模拟试验模块在设计时, 主要考虑便于更换模拟材料和模拟常见航空材料的应力状态, 这包括两个因素。

1) 根据材料不同、监测点位置不同, 更换模拟材料, 研究光纤监测的相容性、适应性。

在飞机结构的健康监测过程中, 根据被监测的机种不同、部位不同, 被监测点的材料也不同。因此建立的模拟试验模块需要根据实际情况, 便于更换材料, 以研究关键点各种常见航空材料模拟粘贴及传感器的相容性等问题。

2) 便于模拟关键部位的应力、应变状态。

一般情况下, 在结构健康监测中各材料、各部位的最大应变不超过 $2000 \mu \varepsilon$, 由于载荷的形式不同、约束不同, 导致被监测点的应力状态不同。然而, 需要贴片监测的位置总是在结构的表面, 因此其应力-应变状态只会有两种: 单向应力-应变状态、平面应力-应变状态。所以建立的关键部位模拟试验模块需要能够产生 $2000 \mu \varepsilon$ 以下的单向应力-应变状态和平面应力-应变状态。

鉴于以上两个需求, 设计的模拟模块采用模块化的思想, 在前述试验加载平台的基础上, 通过放大应力得到最大 $2000 \mu \varepsilon$ 的应力-应变模块。在此基础上采用可更换的结构, 并变换粘贴固定方向得到两种不同的应力-应变状态, 最终得到关键部位模拟试验模块, 其结构如图 6 所示。

根据应力放大原理, 5 个砝码共同加载时应变需要达到 $2000 \mu \varepsilon$, 因此单个砝码需要达到 $400 \mu \varepsilon$ 。

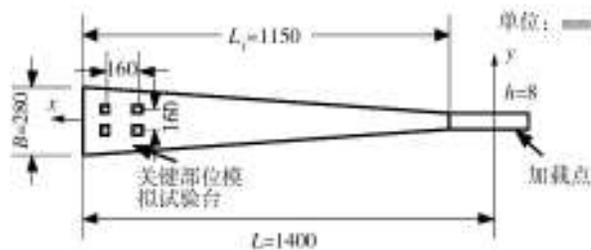


图 6 关键部位模拟试验模块

Fig. 6 The simulated test module of key part

$$d'' = \frac{Eh^3B}{12LF^2} \varepsilon' = \frac{2.001 \times 10^9 \times 0.006^3 \times 0.14}{12 \times 0.8 \times 1.0 \times 9.8} \times 400 \times 10^{-6} = 0.026 \text{ m}$$

$$d_2'' = d_2' - d_{\max} = 0.026 - 0.003 = 0.023 \text{ m}$$

在悬臂梁上靠近根部处, 沿轴向焊接两对高度为 0.023 m 的 4 个凸台, 凸台的位置如图 6 所示, 在凸台的中心预置安装螺孔。在需要对某种材料模拟测试时, 将材料通过螺栓、垫片即可固定在凸台上。考虑到被测材料本身的厚度, d_2'' 可取 0.023 m 。

在使用中, 如果需要进行单向应力-应变测试, 只需沿着悬臂梁的轴线方向敷设光纤传感器。如果光纤传感器的敷设方向不是沿平行梁的轴线方向, 通过变换夹角可以得到不同的应力-应变状态。这样可以根据被模拟的关键点的应力-应变状态, 分析计算得到合适的模拟夹角, 从而得到与被模拟状态一致的应力-应变状态。

5 结论

经过相关试验验证, 该试验系统可以产生 $5000 \mu \varepsilon$ 应变, 测试系统能够测得相应的大应变, 且传感器不失效; 应变与载荷线性度好, 加载系统具有可重复性, 达到预期效果, 能够为光纤传感技术研究提供良好的试验平台。