

# 环境与可靠性测试技术 振动试验夹具

苏州苏试试验仪器股份有限公司

**STI**

# 一、概述

众所周知，夹具是振动试验中的一个很重要的环节，试验的成功与否、试验结果的可信程度与试验夹具的设计、制造及安装使用水平息息相关。

夹具的设计通常由负责振动试验工程的技术人员承担。但实际上，振动设备与夹具的连接比较简单，可试件与夹具的连接则因试件的种类及结构的不同而比较复杂，而且不同类型的试件有不同的动力特性，对夹具的安装及连接的要求也不尽相同。因此，一个“好”的振动试验夹具应该是由负责振动试验工程和负责产品设计工程两方面的技术人员合作完成。



# 一、概论

夹具的动力特性计算是夹具设计工作中的难点，尤其是大型夹具很难按照设计图纸准确计算出其频响特性。随着技术手段的进步，可以采用模拟、仿真等进行估算。因此，在夹具制造完成后，必须通过试验(如正弦扫频、宽带白谱随机振动等)测试其动力特性。如有可能，应加上模拟试件后进行测试，保证夹具的传递特性符合要求。

若不符合要求，则应对已制造完成的夹具进行修正或改进：

- ▲ 增加连接螺栓的数量、增大螺栓的预紧力；
- ▲ 增添加强筋、提高与改善局部刚性。

振动试验夹具的设计与制造，既需要是理论的指导，更需要积累丰富的实践经验。

## 二、试验夹具的用途

振动试验夹具的主要作用是：将试件与振动台进行连接。（见图1）

振动台动圈上部有供安装试件的台面，台面上有很多的螺孔，通常用螺钉将振动夹具牢固地安装在台面上，试件用螺钉连接在振动夹具上。

振动夹具的作用就是为了让试件的孔能与振动台面的螺孔匹配而使用的过渡件。通常，试件需要多方向固定，这是因为试验条件要求进行x、y、z等方向的振动。

在振动试验中，振动试验夹具必不可少。

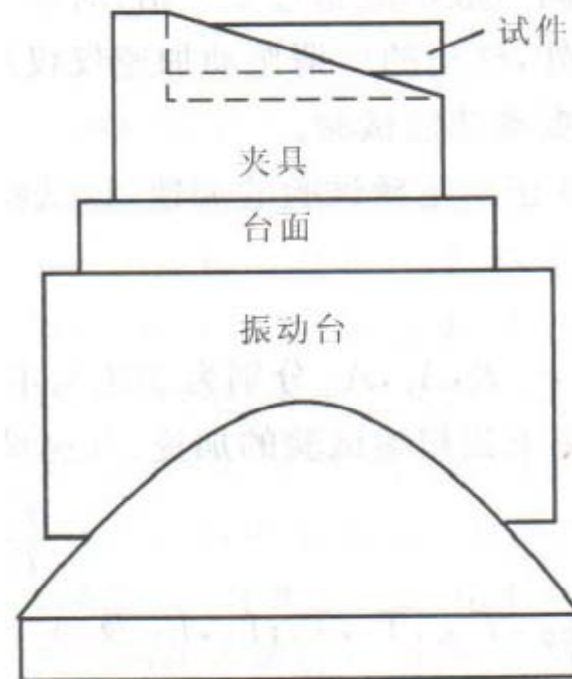


图1 振动台、夹具、试件的关系。

### 三、对试验夹具的要求

振动试验夹具的功能，是将振动台的运动和能量以最合适的方式传递给试件。

图2，给出了振动试验系统各部分运动和能量传递的关系。图中实线表示电能传递路线，虚线表示机械能传递路线。

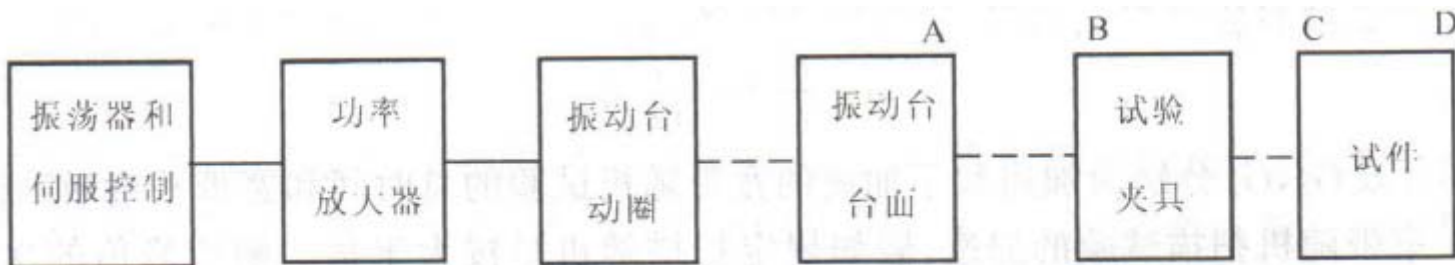


图2 振动台各部分传递关系。

### 三、对试验夹具的要求

在振动试验中，我们希望将振动能量不失真地传递到台面，但这种希望在整个试验频段内不能完全达到（因为存在电谐振和机械谐振）。同样，我们也要求夹具能把台面的运动不失真地传递给试件，希望如图中A、B、C、D各点的运动完全一样，也就是用加速度计在任何一点上测量得到的加速度值和相位应完全一致。要满足这一要求只有夹具是刚体时才能实现。但实际上只有在振动频率较低（比如100Hz以下）时才能把夹具视为刚体。从机械传递的角度看，对夹具的要求类似于对振动台动圈的要求，要求夹具的比刚度尽可能大，也就是说，希望刚度大而重量轻。

我们不能指望动圈和夹具都是刚体。当动圈或夹具发生共振时，其输入和输出将不再保持相同的值，而且夹具上各个点的运动参数也不保持相同的值，这样就对试验过程和试验结果产生影响。实际上，在共振频率前的频域范围内，夹具也不是绝对刚体，振动台面各连接点及夹具上各点运动也不是完全一样的。

### 三、对试验夹具的要求

目前我国尚未制定出针对振动试验夹具的国家标准。因此，可以一般地比较两个夹具的优劣，但不能确切地下结论说哪个合格哪个不合格。为解决这个问题，我们结合美国某公司的夹具设计规范指南，提出了对夹具的基本要求，供大家在具体工作中参考。（见表1）

从该表中可以得出以下一些普遍性的要求和规律：

- A 试件大小、重量不同，对夹具的要求不应该相同。试件越小，要求越高，同时也越容易达到。
- B 对夹具传递性的要求限制了出现共振峰的最低频率，同时限制了高频段出现共振峰的个数及峰值的大小、以及3dB共振带宽的宽度。
- C 对正交运动给出了允许范围。
- D 对试件固定点间的差别做了限制。

# 三、对试验夹具的要求

表1 夹具设计规范指南

典型试件	允许夹具的传递特性	允许夹具的正交运动	试件固定点间的允许偏差
机电设备的小型零件, 典型质量2kg左右	1) 1000Hz以下没有共振峰; 2) 1000Hz以上允许有三个共振峰, 3dB带宽大于100Hz, 放大因子不超过5。	Y向和Z向的振动均小于X向(直到2000Hz)。	1) 1000Hz以下允许振动偏差最大为±20%; 2) 1000Hz~2000Hz允许振动偏差最大为±50%。
机电设备的一般性零件, 典型质量7kg左右、体积164cm <sup>3</sup> 左右	1) 1000Hz以下没有共振峰; 2) 1000Hz以上允许有四个共振峰, 其3dB带宽大于100Hz, 放大因子不超过5。	Y向和Z向的振动均小于X向(直到2000Hz)。	1) 1000Hz以下允许振动偏差最大为±30%; 2) 1000Hz~2000Hz允许振动偏差最大为100%。
异形机械零件(如液压动作筒)、电子设备(如遥测发射器), 典型质量5~25kg, 体积0.03m <sup>3</sup> 左右	1) 800Hz以下没有共振峰; 2) 800Hz~1500Hz允许有四个共振峰, 3dB带宽大于100Hz; 3) 1500Hz~2000Hz, 3dB带宽大于125Hz; 放大因子不超过8。	1) 1000Hz以下, Y向和Z向均小于X向; 2) 1000Hz以上允许为2X; 3) 离开共振区200Hz以外个别地方允许为3X。	1) 1000Hz以下允许振动偏差最大为±50%; 2) 1000Hz~2000Hz可到±100%; 3) 离开共振区200Hz以外个别二点间允许偏差±400%。
较大型设备, 质量约25~250kg, 体积0.3m <sup>3</sup>	1) 500Hz以下没有共振峰; 2) 500Hz~1000Hz允许有二个共振峰, 3dB带宽大于125Hz, 放大因子不超过6; 3) 1000Hz~2000Hz, 允许有三个共振峰, 3dB带宽大于150Hz; 放大因子不超过8。	1) 500Hz以下, Y向和Z向均小于X向; 2) 500Hz~1000Hz小于2X; 3) 1000Hz~2000Hz小于2.5X; 离开共振区200Hz以外个别地方允许为3X。	1) 500Hz以下允许振动偏差最大为±50%; 2) 500Hz~1000Hz可到±100%; 3) 500Hz~1000Hz为±150%, 离共振区200Hz以外允许偏差±200%。
大型设备, 质量超过250kg, 最小边尺寸大于等于60cm	1) 150Hz以下没有共振峰; 2) 150Hz~300Hz允许有一个共振峰, 放大因子不超过3; 3) 300Hz~1000Hz, 允许有三个共振峰, 3dB带宽大于200Hz; 放大因子不超过5; 4) 1000Hz~2000Hz, 允许有五个共振峰, 3dB带宽大于200Hz; 放大因子不超过10。	1) 300Hz以下, Y向和Z向均小于1.5X; 2) 300Hz~2000Hz, Y向和Z向小于2.5X; 3) 300Hz~1000Hz在共振区100Hz外可为3.5X; 4) 1000Hz~2000Hz在共振区150Hz外可为4X。	1) 400Hz以下为±50%; 2) 400Hz~1000Hz为±100%, 在共振区200Hz以外±200%。



### 三、对试验夹具的要求

总结以上，对振动试验夹具的要求归纳如下：

- A 既能方便地与振动台面连接也能方便地与试件连接；
- B 夹具重量应尽可能轻。因为夹具的重量直接影响活动系统的总质量，影响振动台装上试件后所能达到的最大加速度数值；
- C 加工方便、工艺性好，价格尽可能低；
- D 设计加工的周期尽量短。



## 四、试验夹具的种类

### 1、振动试验夹具的分类

专用试验夹具——专门为某个试件设计制造的振动试验夹具。

通用试验夹具——可通用于某一类试件的振动试验夹具。

### 2、立方体夹具

立方体夹具主要用于小型零部件的振动试验，特点是夹具的五个面都可以安装试件。各安装面上设有连接用不锈钢螺纹衬套。为减轻重量，通常采用镁合金或铝合金制造。小尺寸的立方体可用整块材料加工，大尺寸的立方体常用镁或铝合金铸造。夹具上多余的棱角都用机械加工去掉。

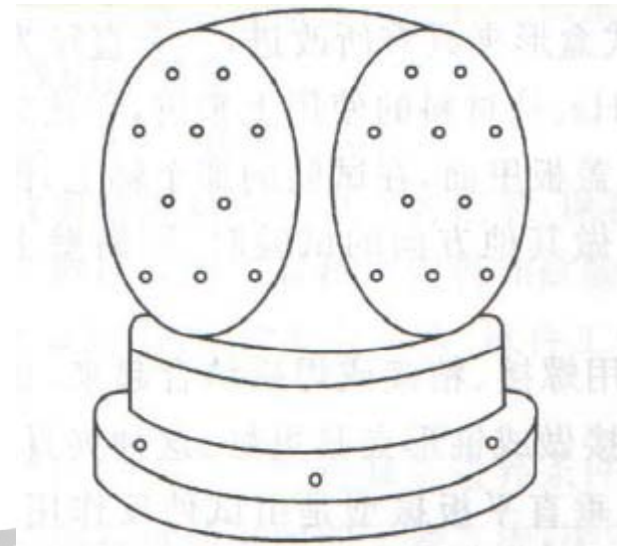


图3 立方体夹具

## 四、试验夹具的种类

### 3、锥形夹具

锥形夹具常用铸造方法制造毛坯，锥形截面和适当厚度的加强筋形成合适的刚度重量比，夹具的一阶谐振频率通常可达到2000Hz或更高，这在其他设计和制造方法中是得不到的。

这种夹具通常是為某个特定试件而定制的，但大多数的锥形夹具也可以做成多用途的，通过转接板还可以轻松实现各轴向的振动试验。

一般来说，锥形夹具的重量要大于试件的重量，在设计时要注意调整夹具和试件组合的重心，使之与振动台动圈的中心重合。

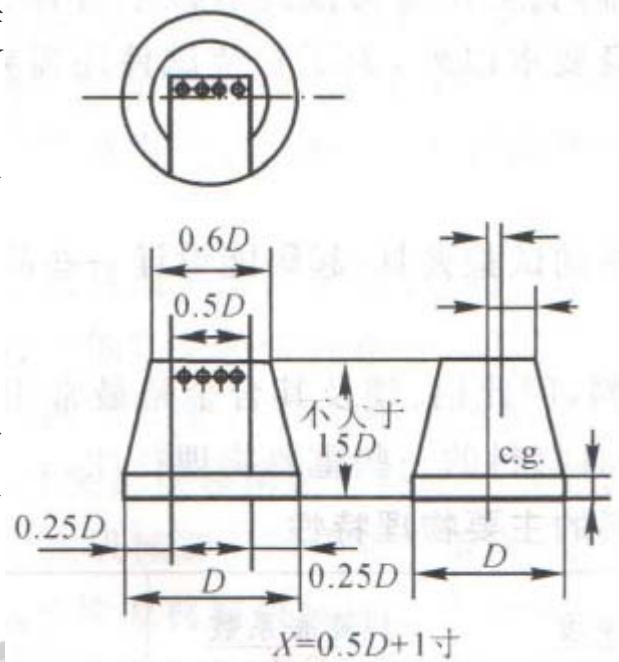


图4 锥形夹具

## 四、试验夹具的种类

### 4、L形夹具

L形夹具常用铸造方法制造，也可以采用焊接、螺接、粘接方法，还可以用整体材料加工。

这种夹具结构简单，经济性好。但垂直平板在某些频率上容易产生共振。垂直平板振型是由试件反作用所激发的。为了避免发生强烈共振，板的厚度必须根据连接重量仔细计算。

同样的，L形夹具的重量要大于试件的重量，在设计时要注意调整夹具和试件组合的重心，使之与振动台动圈的中心重合。

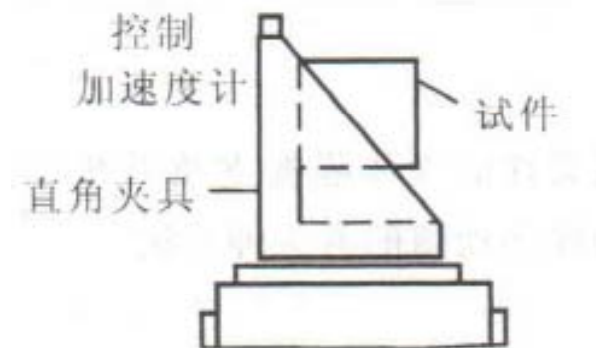


图5 L形夹具

## 四、试验夹具的种类

### 5、T形夹具

T形夹具，除了垂直平板位于中心位置外，其他方面与L形夹具类似。常用铸造方法制造，也可以采用焊接、螺接、粘接方法，还可以用整体材料加工。

试件可以安装在垂直平板的两侧，只要夹具的重量要大于试件的重量，就很容易做到夹具和试件组合的重心与振动台动圈的中心重合。

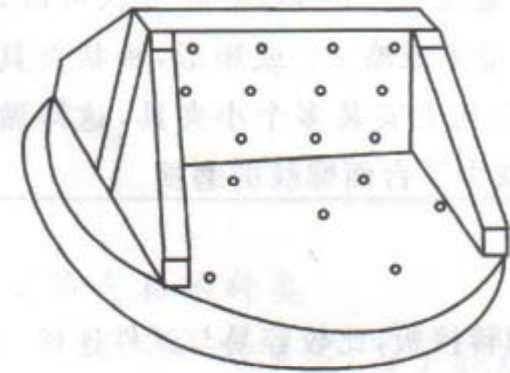


图6 T形夹具

## 四、试验夹具的种类

### 6、封闭盒形夹具

封闭盒形夹具，通常用五块金属板焊接或螺接而成，顶盖(第六块板)通常用螺接。

夹具的底面与振动台动圈连接，试件可以安装在其余的五个平面上。

只要均匀地安装试件，就很容易做到夹具和试件组合的重心与振动台动圈的中心重合。

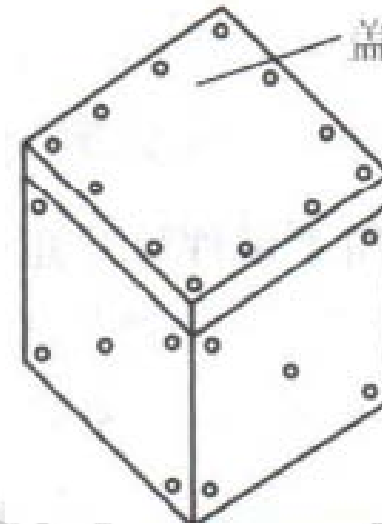


图7 封闭盒形夹具

## 四、试验夹具的种类

### 7、圆筒形夹具

圆筒形夹具，它比封闭盒形夹具有所改进。一个直径为305mm、长度为305mm的圆筒形夹具已经成功用到2000Hz。

从材料的使用上来讲，它比封闭盒形夹具更为有效，一阶谐振频率处在相当高的频段上。

试件安装在端面盖板里面，在试验的那个轴上，圆筒一端固定到振动台上，盖板的运动方向垂直于自身平面。在做其他方向的试验时，圆筒壁上的平底支撑面与振动台连接。

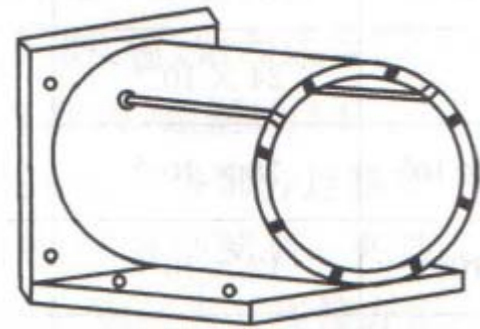


图8 圆筒形夹具

## 四、试验夹具的种类

### 8、锥状夹具

锥状夹具，它适用于大型试件，可增大安装试件的台面面积。

它采用肋状结构已增加刚度与重量比，常用铸造或焊接成型工艺。

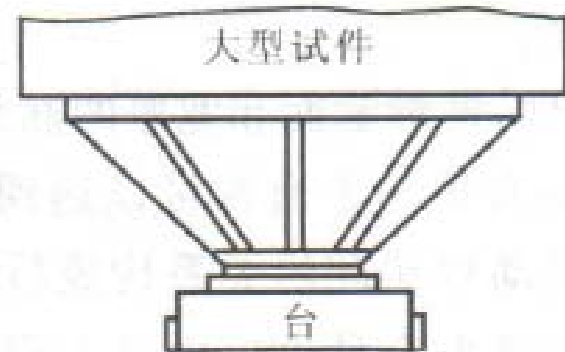


图9 锥状夹具



## 四、试验夹具的种类

### 9、桁架式夹具

桁架式夹具，常用于安装特大型、吊装式试件，用薄壁大口径圆管或薄壁方管焊接而成，管内充填聚氨脂泡沫作为阻尼材料。



图10 桁架式夹具

## 四、试验夹具的种类

### 10、板状夹具

板状夹具，是最简单的夹具，其形状可以是圆形(直径与振动台台面等大或略大)或矩形。板状夹具也可以作为转接板，在其上安装多个小夹具，提高工作效率。

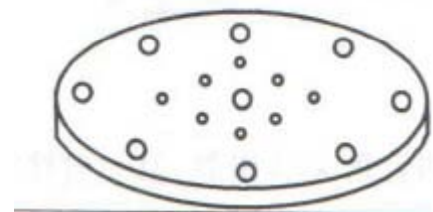


图11 板状夹具

### 11、T形槽转接板

带T形槽转接板，板上有与振动台连接用的安装孔，安装试件用“T”形槽，安装方便，适应性强。

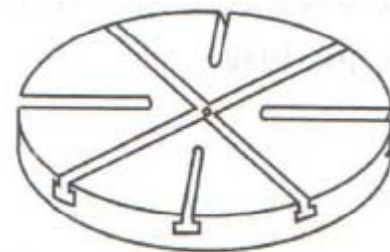


图12 T形槽转接板

## 四、试验夹具的种类

### 12、台面扩展转接板

台面扩展转接板，小直径端与振动台台面连接，大直径端安装试件，常用于尺寸超过振动台台面的试件。

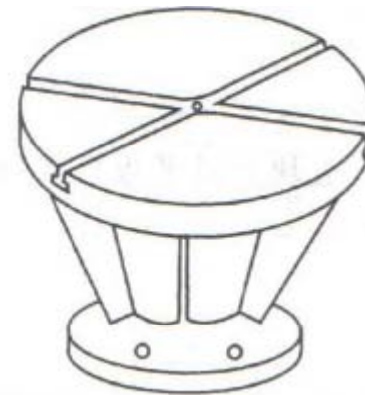


图13 板状夹具

### 13、半球形夹具

半球形夹具的一阶谐振频率于重量比很高，但机械加工困难，通常采用铸造成型。可实现一次完成三方向试验。

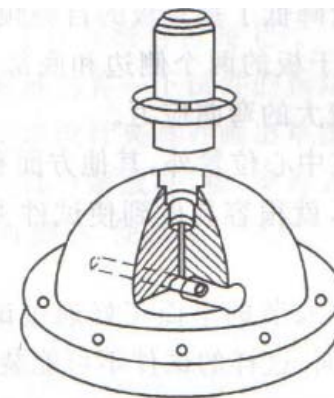


图14 半球形夹具

# 五、振动试验夹具的设计

每个振动试验的工程技术人员都应该掌握设计振动试验夹具的基本技能，最起码能设计一些简单的试验夹具。

## 1、设计原则

### ▲ 材料选择

夹具的材料应尽量采用比刚度大、阻尼大的材料。如镁、铝及其合金。

尽可能不用钢做夹具的主要材料。

材料的比刚度大就意味着质量轻而刚度大，则夹具对推力的影响小、其频响可展宽，因此夹具对振动试验的影响小而传递力或参数的性能却很好。



# 五、振动试验夹具的设计

表2 常用夹具材料的主要物理特性

材料	杨氏模量 $E$ $N \cdot cm^{-2}$	密度 $N \cdot cm^{-3}$	比刚度 cm	热膨胀系数 $^{\circ}C^{-1}$	声速 $km \cdot s^{-1}$
铝	$7.0 \times 10^6$	$2.5 \sim 2.8 \times 10^{-2}$	$2.8 \sim 2.5 \times 10^8$	$24 \times 10^{-6}$	$5.11 \sim 5.23$
钢	$2.1 \times 10^7$	$7 \sim 8 \times 10^{-2}$	$3 \sim 2.6 \times 10^8$	$18 \times 10^{-6}$	$5.05 \sim 5.13$
钛	$3.0 \times 10^7$	$1.85 \times 10^{-2}$	$1.6 \times 10^9$	$12 \times 10^{-6}$	12.6
镁	$5.0 \times 10^6$	$0.94 \times 10^{-2}$	$0.96 \times 10^8$		$4.60 \sim 4.90$



# 五、振动试验夹具的设计

## 1、设计原则

### ▲ 工艺选择

夹具的制造工艺应优先采用整体铸造工艺，其次，可以采用焊接或螺接工艺。

### ▲ 结构选择

夹具的结构形式应优先采用对称封闭形，如立方体、盒形、半球形和锥形等。

### ▲ 连接孔及螺纹

夹具与振动台台面连接孔都应设计称埋头带台阶的孔。安装试件如需要螺纹孔时应采用螺纹衬套或钢丝衬套结构。



# 五、振动试验夹具的设计

## 2、夹具设计的一般步骤

▲ 收集整理对夹具要求的记录，保存过去有关夹具的计算、设计和鉴定的全部资料。

▲ 了解试件的所有技术资料 and 试验条件，包括正弦的和(或)随机的振动试验能级和容差、扫频速率、总试验时间、试件安装要求、试件工作条件、试件及振动台面的连接螺孔或光孔的尺寸和位置等。

▲ 试件的固定应尽量接近真实的边界条件，防止因边界条件不同而造成的过试验或欠试验。

▲ 考虑各试验方向的安装方法，决定对各个轴的试验采用一个夹具还是两个夹具来实现(一个连接在振动台面上，一个连接在水平滑台台面上)。

# 五、振动试验夹具的设计

## 2、夹具设计的一般步骤

.....

▲ 粗略地估算一下试件的预期响应值，无法计算时可使用《规范指南》进行估算。

▲ 按要求设计夹具并画出草图。

▲ 按照草图制作立体模型，进行仿真模拟或有限元计算，根据计算的结果反复修改模型，直到设计符合要求。一般应使夹具的最低固有频率高于试件一阶响应峰值频率的3~4倍。

▲ 完成夹具各零件图纸设计，交付生产。





## 六、振动试验夹具的制造

振动试验夹具的材料和制造方法也是影响夹具使用特性的重要因素。

### 1、制造振动试验夹具的材料

制造振动试验夹具首先要选择材料，材料的强度和疲劳特性在夹具设计和制造中一般很少需要考虑。因为振动夹具的高频特性所要求的刚度使得夹具非常结实。一般来说，夹具很少因强度不足而损坏。

重量是夹具最关键的参数，对同一尺寸的大小的金属而言，铝比镁重1/3，而钢比镁重4倍。而某些铝镁合金的阻尼特性甚至比钢好。因此，铝和镁及其合金是制造振动试验夹具最常用的材料。

控制固有频率的因素是 $E/\rho$ ， $E$ 是杨氏模量， $\rho$ 是材料密度。对大多数金属来说 $E/\rho$ 比值差别不太大，因此设计夹具时仅靠精选材料并不会明显地改变其频率特性

## 六、振动试验夹具的制造

### 2、用整块原材料机械加工制造夹具

用整块材料机械加工制造夹具，这是最快、最省的方法，对于小试件尤为正确。

当夹具时用螺钉将各部分连接称一体时，会出现配合和预应力问题。整体机械加工就避免了上述问题。当然，将试件安装到夹具上也还是需要一些连接件。

控制固有频率的因素是 $E/\rho$ ， $E$ 是杨氏模量， $\rho$ 是材料密度。对大多数金属来说 $E/\rho$ 比值差别不太大，因此设计夹具时仅靠精选材料并不会明显地改变其频率特性。



## 六、振动试验夹具的制造

### 3、螺接夹具

螺接夹具因其连接方便、组合灵活、通用性好而得到广泛应用。

但螺接夹具要想获得较好的性能，无论在设计方面还是在制造方面都需要做相当大的努力。

制造螺接夹具时必须注意两点：

1) 配合面要加工到较高的精度。

2) 螺栓的预紧力矩比最大的分离力至少要大10%。如果没有足够的预紧力，夹具的部件、夹具与试件等结合部位将有可能在振动试验时脱开并相互撞击，给正弦、随机等振动试验带来麻烦。

当部件或试件相互脱开又碰到一起时就引起撞击。这种撞击(在示波器上可看到“毛刺”)常常会超过规定的试验载荷和频率范围。而这种超载试验常会造成试件不应有的损伤，而且给振动台的控制造成不稳定。

## 六、振动试验夹具的制造

### 3、螺接夹具

.....

为了使装配好的零件紧密结合在一起，必须使用大量的高强度螺钉，并拧紧。螺钉的间距要小，否则螺钉间的跨度部分会产生共振。

由于铝和镁材料柔软，连接用的螺钉应采用粗牙螺纹而不是细牙螺纹。如果夹具需要多次装拆，螺钉应拧入钢制的螺纹衬套中。螺钉头部应紧压在淬火的钢制平垫圈上，已保护螺钉头下部的光孔肩部。

依靠螺钉受剪切来传递振动力是很危险的，除小部件或在低加速度的情况下，一般不能单独依靠螺钉传递剪切力。如果可能，用某些方法增加各部件之间的摩擦力。

# 六、振动试验夹具的制造

## 4、铸造夹具

在要求有曲面的场合应考虑采用铸造夹具。

任何奇形怪状的试件它都能适应，能满足多方面的设计要求：如要求一定厚度的截面、变剖面、很多角撑板、复杂截面等，可以达到频率重量比最大。

采用铸造夹具的最大理由是铸造合金阻尼相当高。阻尼能降低输出输入比，减小共振幅度。但是这种合金的加工性能或焊接性能都不是很好。具有高阻尼的合金一般都具有下列共同因素：

- ▲ 合金含量低
- ▲ 相当粗糙的粒度
- ▲ 屈服强度相当低
- ▲ 在铸造状态性能最好



## 六、振动试验夹具的制造

### 5、焊接夹具

在振动试验的早期曾广泛使用螺接夹具，其最明显的缺陷是不能防止夹具各部分的相对运动，造成波形有“毛刺”畸变。

这样铸造夹具就被普遍采用了。但由于铸造夹具成本高、生产周期长，目前又普遍采用焊接夹具。与铸造夹具相比，焊接夹具更省时间(约为铸造时间的1/7)，节约费用(是铸造夹具的1/3)。

由于过去有些焊接件在振动载荷下断裂，使得大家在使用焊接夹具时心有余悸。随着焊接技术水平的不断提高，焊接夹具的使用越来越多的被接受。

## 六、振动试验夹具的制造

### 6、螺纹衬套

在这里有必要详细介绍螺纹衬套的使用。

虽然钢制的螺钉能随时拧进铝或镁一类的轻、软金属中去，但轻、软金属一侧的螺纹很可能遭到损坏，这种隐患在振动载荷下有所增加。而且当螺钉反复拧入和拆卸时，由于磨损使得这个隐患更进一步增长。在这种情况下，振动台面、振动夹具和中间装置或转接体等，都应该加装螺纹衬套。

这些衬套通常是用硬钢制成(为了避免衬套和本体产生电解现象，一般选用不锈钢)，并同轻、软金属螺接并固定，这样就可以适应机制螺钉的使用。

还有一种是钢丝螺套，用不锈钢丝绕制而成，螺套内外均是螺纹，将其嵌入轻、软金属中便于机制螺钉拧紧。

## 六、振动试验夹具的制造

### 7、小结

▲ 当使用水平滑台时，硬注意剪切力。剪切时的“毛刺”同样会造成波形失真。这种横向撞击形成的剪切危害远大于垂直振动。

▲ 形状比较复杂的曲面或变厚度、变截面夹具，一般用铸造的方法制造。铸造合金的阻尼较大，因而有利于减小共振幅度。缺点是生产、加工周期较长。

▲ 焊接夹具制造比较方便，成本低，但焊接质量必须要好，否则焊接件在振动时会断裂。焊接夹具比螺接夹具好在无“毛刺”，比铸造省时，但关键是焊接的质量要有保证。

▲ 对小型的夹具粘接比焊接更快更省时。最常用的粘接剂是环氧树脂。有资料表明，螺接、焊接、粘接制造同样的夹具时，焊接的共振频率稍高些，粘接的共振放大倍数稍低些，但均大于螺接。

▲ 对大型而又需要重量轻的夹具，也可用胶木板、环氧树



## 七、夹具测试

夹具设计过程中对其动态特性的计算是比较粗略的、不精确的，只是估计值。

在夹具制造完成后，必须进行检测。

### 1、夹具判断要点

▲ 试件一阶谐振频率和夹具一阶谐振频率之比应限制在0.5~1.4之间。超出此范围时应增加阻尼或采取相应的自动增益控制和功率储备。

▲ 夹具振动加速度传递特性应在+20dB~-3dB间。若比-3dB还要小时，应能通过自动增益控制提高振动的量级。

▲ 夹具的横向振动应尽量小，通常不得大于30%，对极个别点也不应超过50%。

# 七、夹具测试

## 2、夹具测试方法

### ▲ 扫描法

用正弦扫频试验来测量夹具的传递特性。从频率响应特性曲线上可以确定各个自然固有频率及每个谐振频率的放大倍数和3dB带宽，也可以测量出试件几个固定点之间的运动偏差值。

### ▲ 锤击法(冲击响应法)

用力锤敲击振动输入部位(与振动台连接处)，测量夹具与试件连接部位的响应。



# 七、夹具测试

## 3、测试的顺序性、重复性、互易性

### ▲ 顺序性

为保证测试精度，测试的过程最好时先夹具、后试件加夹具在振动台上进行测试。同时比较它们之间的差异，就能看出夹具设计和实践之间的异同。若设计与实测的差异在5%~10%，是可以接受的；若差异在15%以上，则应对夹具进行修正。

### ▲ 重复性

测试中，可选几个点，在测试开始和结束时测量频响，对同一个点，自身的重复性一般应在5%以内。

### ▲ 互易性

激振点与测试点互换后所得频率响应函数的误差应小于5%。若按顺序进行试验，试验结果具有重复性和互易性，与理论值的误差不大，则夹具的设计和试验都是成功的。

# 七、夹具测试

## 4、测试点布置

测试点的布置除了理论上、试验上的需要外，更多的是靠经验来确定。

必须兼顾振动台面、夹具和试件的状况。台面上要设置参考点(一般取台面中心)，以监视均匀度和横向振动，同时还要注意振动的传递效果。

夹具的布点要根据表1和前述的原则；试件上的布点，除了根据试验要求确定外，还要根据试验状态和试验条件来确定，特别是随机振动试验中的平均控制或最大、最小值控制的试验要求确定布点。

# 谢谢！

