

# 小型夹具随机振动试验高频超差问题研究

许红卫, 马啸宇, 周建, 宋少伟  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘要:**从试验夹具、夹具与振动台滑台之间的连接螺栓数目、连接刚度、连接非线性及连接阻尼等方面,分析了发动机测控电缆在随机振动试验中出现高频超差的原因。针对这些因素,提出采用降低夹具重心、提高夹具与滑台连接刚度、改善连接阻尼、多点控制等方法,解决了小型夹具在随机振动试验中出现高频超差问题,提高了小型夹具随机振动试验的控制精度和试验质量。此外,在小型夹具随机振动试验高频超差问题的研究中,给出了随机振动试验中低量级振动试验控制效果较好,而高量级随机振动试验时出现高频超差的原因;通过在夹具与台面之间加入毛毡方式,解释了试验中看似相同的两方向振动试验,控制效果却完全不同的原因。

**关键词:**振动试验;高频超差;工装夹具

**中图分类号:**V433      **文献标识码:**A      **文章编号:**1672-9374(2019)01-0073-04

## Study on the excess vibration in high frequency region in random vibration test of small fixture

XU Hongwei, MA Xiaoyu, ZHOU Jian, SONG Shaowei  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The causes of excess vibration in high frequency region in random vibration test of control cables were analyzed, including vibration test fixture design, numbers of connection screws, connection stiffness, connection nonlinearity and connection damping. In order to solve the excess vibration in high frequency region, the solutions, including reducing the fixture center of gravity, increasing connection stiffness, improving connection damping and multipoint control, were proposed and the control precision and test quality can be improved in random vibration test of small fixture. In addition, the problems encountered in some projects were well explained by this work: 1) the control effect is better in low-order vibration, but the excess vibration in high frequency region occurs in high-order vibration. 2) the control effect is utterly different when the vibration tests look like the same in two directions.

**Keywords:** vibration test; high frequency excess vibration; fixture

## 0 引言

振动试验主要考核产品的可靠性,暴露产品在设计、工艺、质量等方面的缺陷。随机振动试验中,要求控制信号必须平稳、各态历经并在规定的容差范围内。但实际试验中往往会出现控制曲线高频部分超出容差带的限制(简称为高频超差)<sup>[1-4]</sup>,从而影响试验考核结果的准确性和有效性。在某发动机测控电缆随机振动试验中,偶尔会出现高频超差现象,为提高试验考核准确性,有必要对测控电缆随机振动试验中出现高频超差的问题进行相关研究,分析原因并找出小型夹具随机振动试验高频超差相应的解决方案。

## 1 高频超差原因分析

振动试验高频超差的原因有很多,如人员、设备、产品、试验方法和环境等因素,通过对测控电缆长期的跟踪试验分析发现,高频超差原因主要可以归结为振动试验夹具设计不合理及滑台与振动试验夹具之间的连接问题,主要影响因素有以下几方面。

### 1.1 连接螺栓数量少

测控电缆振动试验夹具有多种,主要为矩形条状夹具,如图 1 所示,测控电缆振动试验夹具与滑台之间采用两根螺栓连接。测控电缆随机振动试验中最高频率为 2 000 Hz,按照振动试验夹具设计的一般要求<sup>[5-7]</sup>,在振动台上安装夹具后,其一阶频率要大于 2 000 Hz,对于一些质量小、重心低的夹具容易实现该要求,而对于质量大、重心高的夹具,采用两根螺钉连接,其一阶频率通常会低于 2 000 Hz,容易在共振点处发生超差现象。



图 1 振动试验夹具

Fig. 1 Vibration test fixture

### 1.2 连接面平面度较差

试验中发现,将图 1 所示的试验夹具与两个不同的振动台滑台相连,随机振动控制曲线分别如

图 2 和图 3 所示。从图中可见,在 1#振动台上出现了控制曲线高频超差现象,而在 2#振动台上控制曲线全部在误差带内。经观察发现,1#振动台滑台存在微变形,中间出现突起,导致连接面不平整,使得台面到振动试验夹具控制点的传递特性较差,由此引发高频超差问题。

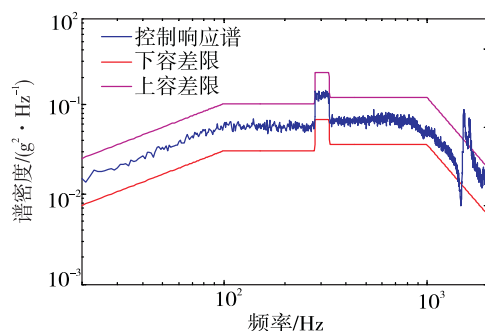


图 2 1#振动台上控制响应曲线

Fig. 2 Control spectrum curve on 1# vibrostand

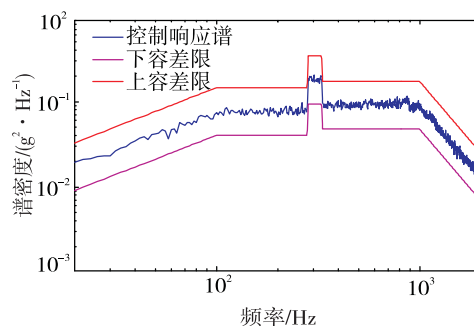


图 3 2#振动台上控制响应曲线

Fig. 3 Control spectrum curve on 2# vibrostand

### 1.3 滑台与振动试验夹具连接刚度影响

用 2#振动台对图 1 所示的夹具进行  $x$  向与  $y$  向白噪声随机振动试验,获取振动台滑台到夹具上表面控制点之间的传递特性曲线,如图 4 所示。从图 4 中可见,在 2#振动台上进行  $x$  向随机振动试验时,夹具一阶频率为 1 017 Hz,进行  $y$  向随机振动试验时,一阶频率为 1 647 Hz。从宏观上看, $x$  向与  $y$  向振动试验中,虽然夹具近似对称,其传递特性却相差很大。以上结果表明:看似相同的两个方向振动试验,其传递特性可能相差较大,即使同一方向的振动试验,不同的振动台上得到的传递特性曲线也可能不一样。由此解释了试验过程中,看似两个方向一样的振动试验,一个方向控制响应效果较好,

而另一个方向却出现高频超差问题,其主要原因在于夹具和台面构成的结构系统的动态特性发生了改变。结构系统的动态特性变化主要原因在于滑台与振动试验夹具的连接刚度发生了改变,这从宏观上是无法考虑的<sup>[8-10]</sup>。进一步的试验通过在滑台与振动夹具之间加入1 mm厚的毛毡,其传递特性如图5所示。由图5可知,在加入毛毡后,两个方向的传递特性基本一致。

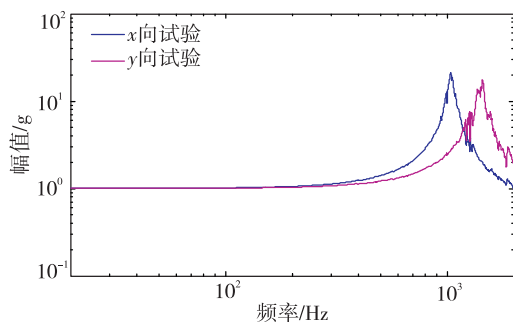


图4 2#振动台上传递特性曲线

Fig. 4 Transfer curve on 2# vibrostand

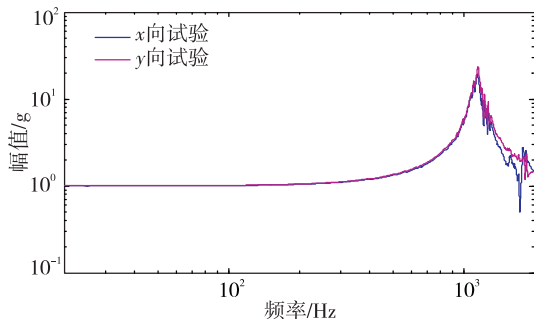


图5 2#振动台上加垫后传递特性曲线

Fig. 5 Transfer curve on 2# vibrostand with the felt

#### 1.4 滑台与振动试验夹具连接非线性特性影响

测控电缆随机振动试验过程中还会出现一种现象,即在低量级振动试验时控制响应曲线很好,随着量级的不断增大,有时也会出现高频超差现象,图6显示了在-12 dB时的控制响应曲线,图7显示了在0 dB时的控制响应曲线。这种现象产生的主要原因在于滑台与振动试验夹具的连接非线性,在进行随机振动控制时,控制系统在小量级下获得传递特性曲线,然后进行迭代循环控制,由于滑台和振动试验夹具间的连接非线性,在高量级时,其传递特性曲线会发生改变,这就导致迭代过

程出现误差,发生高频超差现象。

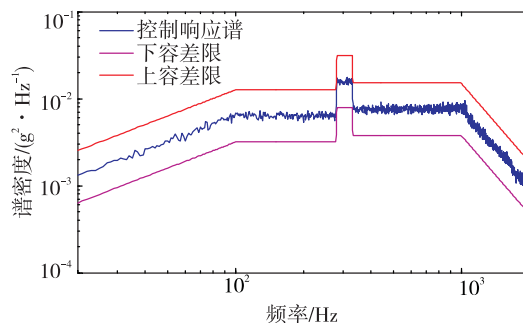


图6 -12 dB量级时的控制响应曲线

Fig. 6 Control spectrum curve at -12 dB

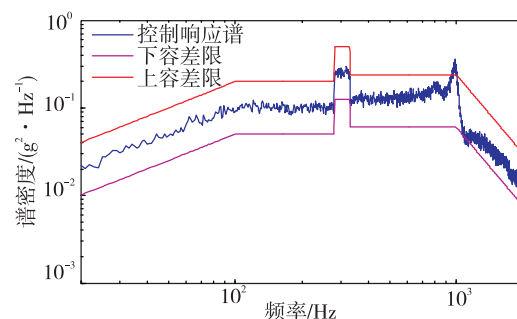


图7 0 dB量级时的控制响应曲线

Fig. 7 Control spectrum curve at 0 dB

#### 1.5 滑台与振动试验夹具之间的连接阻尼影响

在3#振动台上对图1所示的夹具进行随机振动试验时,其控制响应曲线如图7所示,高频出现超差现象,而当在滑台与振动试验夹具工装之间加入毛毡时,其控制响应曲线如图8所示,无高频超差现象。这主要是由于加毛毡后,阻尼增大,有助于平稳控制。

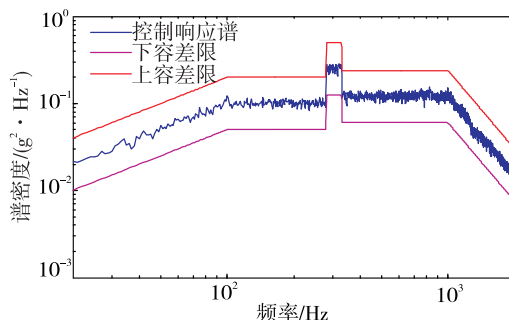


图8 加毛毡时的控制响应曲线

Fig. 8 Control spectrum curve with the felt

## 2 解决途径

随机振动试验中,当出现控制高频超差时,通常的解决途径为首先将系统各环节孤立开来,逐一进行测试分析。先判断控制仪、振动台是否出现故障,检查的基本方法为空台进行正弦和随机振动试验,如果控制谱正常,而且台体无异常声音,则基本排除控制系统和振动台问题。然后分析夹具设计与安装问题,可以考虑采取以下方法:

1)对小型夹具设计,应尽量保证夹具与滑台连接后的频率高于振动试验最高频率,可以采取降低重心的方式。

2)保证夹具与振动台滑台连接紧密,并采用尽量多的连接螺栓,以提高夹具与滑台连接后的频率。

3)改善连接阻尼,在夹具与滑台之间垫毛毡或橡胶垫等阻尼材料,厚度适度。这样不仅可以增大阻尼,而且可以削弱夹具与滑台之间的接触非线性效应。

此外,对于小型夹具振动试验,采用多点平均控制也可有效抑制高频超差问题。

## 3 结论

测控电缆随机振动试验中的高频超差问题,主要原因在于夹具设计及与滑台之间的连接特性。在解决方法上可以针对这两个方面进行改进,同时也可以通过改变控制方法来抑制高频超差。本研究为解决小型夹具随机振动试验的高频超差问题提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 王招霞,杨松,李含忠,等. 部组件振动试验中高频超差问题的探讨[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(6): 359-362.
- [2] 吴金涛,魏大忠,李刚,等. 200N·m·s 控制力矩陀螺随机振动试验控制谱高频超差的研究[J]. 空间控制技术与应用, 2012, 38(4): 51-56.
- [3] 沈志强,方贵前,冯咬齐,等. 太阳能电池阵随机振动试验高频超差特性分析与优化[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(1): 72-77.
- [4] 邱大芦,次永伟,邵小平,等. 随机振动加速度功率谱密度带外超差问题分析[J]. 动力学与控制学报, 2014, 12(3): 243-247.
- [5] 唐德效,邵兆申. 一种通用振动夹具的设计[J]. 空间电子技术, 2009(2): 95-99.
- [6] 武同发. 美军标 810F 与振动试验技术的改进[J]. 火箭推进, 2002, 28(4): 27-31.  
WU T F. American standard 810F and improved vibration test technology[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2002, 28(4): 27-31.
- [7] 郭荣平,段文颖,施军. 随机振动试验夹具设计与研究[J]. 振动·测试与诊断, 1997, 17(1): 52-56.
- [8] 张艺,史熙. 表面织构对界面接触参数影响的实验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(4): 439-446.
- [9] 邢建伟,许彦昭,栾宇,等. 两种典型螺栓连接结构的刚度特性比较研究[J]. 力学与实践, 2016, 38(1): 27-32.
- [10] 陈永会,张学良,温淑花,等. 粗糙表面塑性接触连续光滑指数函数模型与法向接触刚度研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(7): 58-67.

(编辑:马 杰)