

# 力限试验夹具及 FMD 技术研究

岳志勇, 张俊刚, 冯咬齐, 沈凤霞  
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 文章以某卫星中心承力筒纵向振动力限控制试验为例, 对力限控制试验的夹具及 FMD (力测量装置) 进行了介绍。通过与加速度控制试验比较, 对力限控制试验引起产品一阶频率前移的原因进行分析, 并通过有限元仿真探讨了力限试验夹具及 FMD 存在问题及改进方法, 为今后国内深入开展力限试验研究提供了参考。

**关键词:** 振动试验; 力限; 夹具; FMD

**中图分类号:** V416.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1379(2007)04-0244-04

## 1 前言

目前国内航天器振动试验主要采用加速度控制方法。该方法由于采用航天器实际飞行中测量得到的加速度包络线作为试验的输入条件, 而未考虑航天器在振动试验中的边界条件与飞行中实际边界条件的不同, 因此容易产生过试验问题。

减轻航天器振动试验中过试验问题的常用方法包括加速度谱主动下凹及关键点响应限幅控制方法和力响应控制(力限控制方法)两种。加速度谱主动下凹及关键点响应限幅控制方法目前仍然是我国航天器振动试验中使用的主要方法, 但该方法在实际使用中也暴露了许多缺点, 因为高量级试验中的试验条件是依靠低量级试验的结果来制订的, 但是由于产品存在非线性特点以及控制系统在高量级和低量级试验中存在控制效果差异, 因此加速度谱下凹的范围和关键点的选择及限幅范围并不容易确定, 如选择不当仍会引起过试验甚至欠试验问题。力限控制方法由于同时限制了卫星连接面处加速度和受力两方面情况, 是加速度和力双重控制方法。在力限控制方法中, 主要以加速度试验条件进行控制; 当卫星共振时输入给卫星的力超过给定条件时, 力试验条件起响应限幅控制作用, 使加速度试验条件自动下凹, 从而有效解决试验中过、欠试验问题。在力限控制试验中, 力测量和控制技术是试验质量的关键, 因此对力限试验夹具及 FMD (Force Measurement Device, 力测量

装置) 提出了很高的要求。力限控制方法从上世纪 90 年代开始逐渐在美国 NASA 和欧空局得到了应用<sup>[1,2]</sup>。但在我国的航天领域, 力限控制方法的研究刚刚开始。

北京卫星环境工程研究所在力限控制技术的研究方面已经取得了一定的成果<sup>[3]</sup>。笔者也曾以某型号承力筒的纵向正弦振动力限控制试验为例, 对力限控制试验平台及其力信号处理、力传感器校准等技术进行了介绍, 对试验结果进行了初步的分析<sup>[4]</sup>。本文在此基础上, 进一步通过力限控制试验和加速度控制试验中所用试验夹具的比较, 指出夹具的差异是力限试验方法中产品一阶频率漂移的主要原因; 通过对夹具的有限元建模分析, 并参考国外的研究成果, 指出力限试验夹具及 FMD 的优化方向。

## 2 力限试验夹具及 FMD 介绍

在力限试验中, 使用现有的铸铝夹具花盆(同承力筒加速度控制试验使用的夹具花盆相似)、4 个单向力传感器及新研制的安装环共同作为力限试验夹具, 同时兼具 FMD 作用。

力传感器为 kistler 9061A 单向力传感器, 测量范围 0~200 kN, 灵敏度约为 4.3 pc/N。

安装环为厚 40 mm 的不锈钢环, 其与产品的连接方式同加速度控制试验完全一样。4 个力传感器均匀布置在夹具花盆和安装环之间, 通过 M20×120 的螺栓连接, 相当于 4 点支撑。由于仅

收稿日期: 2006-07-17; 修回日期: 2007-05-15

作者简介: 岳志勇 (1972-), 男, 工程师, 博士学位, 主要从事航天器动力学环境试验的研究工作。联系电话: (010) 68746251。

进行纵向正弦振动力限控制试验, 因此 4 个力传感器的信号可以进行简单物理叠加后形成一个合力信号供控制系统使用。

### 3 力限试验结果分析

#### 3.1 力限试验结果同加速度试验结果比较

图 1 为 0.1 g 输入条件下, 分别使用加速度控制方法(采用加速度控制试验夹具)和力限控制方法(采用力限控制试验夹具)得到的控制曲线, 从图中可以看到, 与加速度控制方法试验结果相比, 力限试验中产品的一阶频率产生了约 7 Hz 的前移。

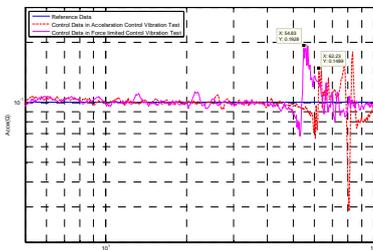


图 1 0.1 g 输入条件下控制曲线比较

Fig.1 Comparison of control curves under 0.1 g input

#### 3.2 产品一阶频率前移原因分析

根据夹具设计准则的要求, 夹具的一阶频率应该大于产品一阶频率的 3~5 倍或者大于试验最高频率。由于产品的一阶频率在 62 Hz 左右, 因此夹具的一阶频率最好大于 300 Hz。有限元计算及以往的试验数据表明, 加速度控制试验所用夹具的一阶频率在 300 Hz 以上, 满足夹具设计准则要求。而力限试验夹具由于使用了 4 点支撑的方式, 夹具的刚度相对降低许多, 其一阶频率虽然大于试验最高频率 100 Hz (试验前夹具正弦扫频调试发现在 100 Hz 内无共振峰值), 但远小于加速度控制振动试验所用夹具的一阶频率。

下面利用大型有限元工具 Ansys, 对力限试验夹具及 FMD 进行建模分析, 有限元模型如图 2。

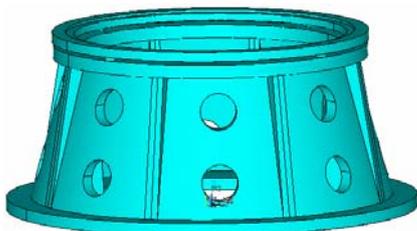


图 2 力限试验夹具及 FMD 有限元模型

Fig.2 FEM model of fixture and FMD in force limited vibration tests

在建模分析时, 考虑到试验夹具的下表面与振动台为螺栓连接, 可以将下表面近似为固支结构, 其中 4 个力传感器近似为钢结构, 只是在垂直向刚度略低(刚度约为同形状钢结构的二分之一)。为了有限元计算方便, 将 4 个力传感器近似等效为 4 个钢制空心圆柱, 并对其材料特性略作调整, 使空心圆柱的刚度性能与传感器的刚度性能基本一致。根据夹具前期调试结果, 该有限元模型求得的频率误差在 20% 以内, 可以满足定性研究的要求。夹具前 3 阶频率及振型见图 3~5。

从图中可以看到, 力限试验夹具及 FMD 的前三阶振型均为安装环的局部变形, 且基频远小于 300 Hz, 与加速度控制试验所用夹具的基频相差较大, 这也是力限试验中引起产品一阶频率漂移的主要原因。

### 4 力限试验夹具及 FMD 优化技术

在承力筒力限试验中, 由于力限试验夹具的原因, 产品一阶频率相对于加速度控制试验前移了 7 Hz 左右, 这使同量级的力限控制试验与加速度控制试验的控制曲线产生了差异(如图 1 所示), 从而使原来准备进行的力限试验与加速度试验的响应数据比较分析无法进行; 同时, 力限试验夹具的一阶频率小于 300 Hz 也不能完全满足夹具设计准则的要求。为了使力限试验方法能够真正应用到我国的航天器振动试验中去, 就必须优化力限试验夹具和 FMD, 使夹具的频率能够很好地满足振动试验要求。

#### 4.1 承力筒力限试验夹具及 FMD 改进方法

为了提高力限试验夹具的基频, 可以通过增加力传感器的数量也就是提高支撑点的数目来提高夹具刚度, 例如可以将力传感器数量改为 8 个并且对称分布(根据垂直向和水平向振动试验经验及夹具花盆的常用结构形状, 力传感器的数目取 4、8、16、24、32……较好), 求得安装环的前三阶频率和振型如图 6~8。从图中可以看到, 夹具的基频显著提高, 且其对应的振型已经不再是单纯的安装环局部变形, 而是安装环局部变形伴随夹具整体变形。

在承力筒力限试验夹具的基础上, 为了充分

研究各种因素对夹具基频的影响,采取改变安装环材料、改变力传感器的数目和改变安装环的厚度等措施,利用 Ansys 软件进行建模分析。夹具的前三阶频率结果如表 1 所示。

表 1 力限试验夹具频率比较  
Table 1 Comparison of frequency of fixtures

安装环材料	力传感器数目/个	安装环厚度/mm	夹具频率/Hz		
			第一阶	第二阶	第三阶
不锈钢	4	40	138	166	166
		80	160	247	247
	8	40	427	427	532
		80	381	381	477
铸铝	4	40	164	181	181
		80	192	272	273
	8	40	492	492	583
		80	466	466	560

从表 1 中可以看出:安装环材料使用铸铝时力限试验夹具的基频较高,但差别并不显著(小于 25%);增加力传感器数目可以显著提高力限试验夹具基频;增加安装环厚度对提高力限试验夹具基频作用不大,甚至有可能使夹具基频下降。

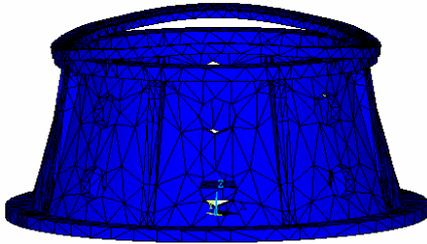


图 3 第一阶振型 (138 Hz)  
Fig.3 The first mode (138 Hz)

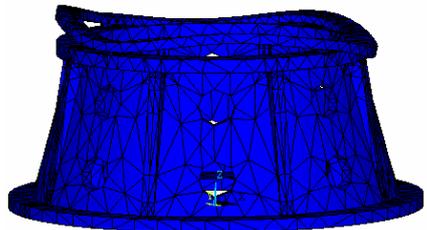


图 4 第二阶振型 (166 Hz)  
Fig.4 The second mode (166 Hz)

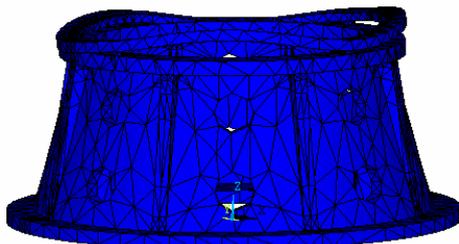


图 5 第三阶振型 (166 Hz)  
Fig.5 The third mode (166 Hz)

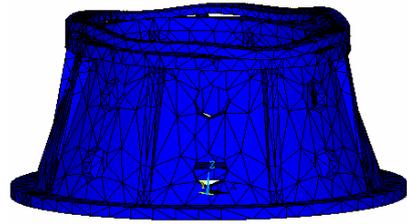


图 6 第一阶振型 (427 Hz)  
Fig.6 The first mode(427 Hz)

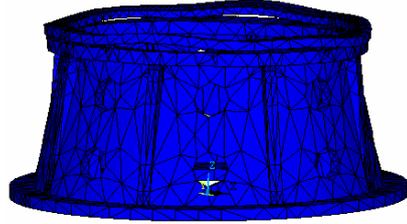


图 7 第二阶振型 (427 Hz)  
Fig.7 The second mode (427 Hz)

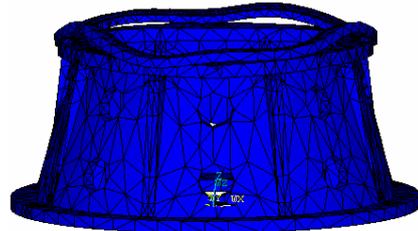


图 8 第三阶振型 (532 Hz)  
Fig.8 The third mode (532 Hz)

#### 4.2 优化力限试验夹具及 FMD 的其他方法

文献[5]介绍了大型整星振动试验使用的独立 FMD (测力环),见图 9。该测力环为铜环,使用了 8 个三向力传感器,力传感器的安装方式如图 10。该类型 FMD 对某些卫星可以同时兼有力限试验夹具的作用,也可以与夹具花盆配合使用共同作为力限试验夹具。测力环可以放在夹具花盆的上面,其效果同承力筒力限试验夹具一致;也可以放在夹具花盆的下面,如图 11 所示。

文献[6]介绍了质量为 100 kg 的微小卫星的力限试验,其中测力环使用了 4 个三向力传感器。但是该卫星结构尺寸较小,其力限试验 FMD 的尺寸也比较小;因此即使只使用 4 个力传感器,其基频也会比较高,可以满足试验要求。

从以上研究中可以得知:对于结构小和重量轻的卫星或部组件试验,由于力限试验夹具及 FMD 的尺寸一般也较小,因此使用 4 个力传感器即可;而对于大型卫星试验,使用 8 个或更多的力传感器比较好。对于小型卫星或部组件试验,可以采用

独立 FMD 同时作为夹具使用; 而对于大型卫星试验, 最好将夹具和 FMD 分别设计, FMD 可以选择位于夹具的上面或下面。FMD 位于夹具上面, 优点是测力比较准确, 缺点是针对不同型号卫星必须设计多套 FMD; FMD 位于夹具下面, 优点是可以用一套 FMD 配合多套夹具花盆使用, 缺点是测力结果中必须考虑减去夹具花盆质量的响应, 因此夹具花盆质量必须远小于卫星质量(一般认为应小于 10%), 且夹具花盆基频必须比较高。



图9 FMD (力测量设备)  
Fig.9 Force measurement device

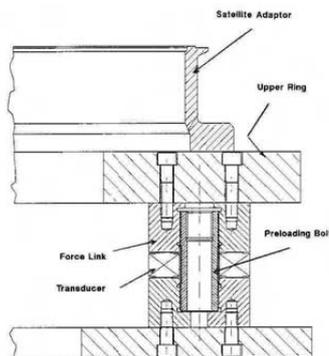


图10 力传感器安装示意图  
Fig.10 Assembling of the force sensor



图11 力限试验夹具(测力环位于夹具花盆下面)  
Fig.11 Fixture used in force limited vibration test  
(FMD under the bottom of fixture)

## 5 结论及展望

通过承力筒力限试验夹具的有限元分析和前期调研结果, 可以得到如下结论:

(1) 对于大型卫星力限试验, 一般采用 8 个力传感器的 8 点支撑方式, 即可有效提高夹具及 FMD 的频率, 满足试验要求;

(2) 对于大型卫星力限试验, 在试验夹具强度和刚度满足要求的条件下, 安装环的厚度越小越好, 安装环材料可以选择钢、铜或密度较小的铝;

(3) 为了使力限试验 FMD 有通用性, 可以将 FMD 设计为单独的测力环设备, 测力环与不同夹具花盆配合可组成多个型号的力限试验夹具。

本文只是基于承力筒纵向正弦振动力限控制试验中使用的力限试验夹具进行了仿真计算和定性分析, 对目前市场上存在的如 Kistler 公司的测力环装置等并未详细论述。要想将力限试验夹具及 FMD 全面应用到我国的航天器振动试验中去, 还有许多工作要做, 包括: 掌握测力环的详细结构及特性要求; 进行测力环的测量精度研究; 分析测力环分别放置在夹具上、下表面时对力测量结果的影响; 进行横向试验时力矩的计算; 分析力限试验夹具对承力筒根部局部受力的影响等等。

### 参考文献 (References)

- [1] Force limited vibration testing monograph[R]. NASA Reference Publication RP-1403, 1997-5
- [2] Force limited vibration testing[R]. NASA Technical Handbook 7004B, 2003-1
- [3] 张俊刚, 庞贺伟. 振动试验中力限控制技术[J]. 航天器环境工程, 2005, 22(5): 253-256[Zhang Jungang, Pang Hewei. The force limited control technique in vibration test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(5): 253-256]
- [4] 岳志勇, 张俊刚, 冯咬齐, 等. 力限控制方法试验验证技术研究[J]. 航天器环境工程, 2006, 23 (4): 227-231 [Yue Zhiyong, Zhang Jungang, Feng Yaoqi, et al. The application of force limited method in vibration test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 23(4): 253-256]
- [5] Brunner O, Braeken R. Force measurement device for ARIANE 5 payloads[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Environmental Testing for Space Programmes. Noordwijk, The Netherlands 2004-08. 233-240. ESA SP-558
- [6] Kim Youngkey K, Kim Kyung-Won, Kim Hong-Bae. Review experiments on NASA RP-1403 'Force limited vibration testing monograph'[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Environmental Testing for Space Programmes. Noordwijk, The Netherlands 2004-8. 217-221. ESA SP-558