

## 光学小卫星振动夹具设计及动特性分析

闫 勇<sup>1,2</sup>, 姚劲松<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033)

**摘 要:** 夹具是卫星振动试验的传力部件, 夹具性能的好坏直接影响到振动试验的真实性和可靠性。总结了卫星振动夹具设计的一般方法和思路, 针对某光学小卫星振动夹具进行了设计工作, 利用有限元软件 MSC.NASTRAN 对振动夹具动特性进行了分析, 对其刚度、质量、固有频率及动特性响应间的关系进行了研究, 完成了某光学小卫星振动夹具的设计工作, 从其动特性响应分析结果看, 带振动夹具后整星动特性响应平均偏差约为 6%, 最大响应偏差约为 11%, 振动夹具对整星动特性影响在合理范围内, 目前该振动夹具已成功应用于某光学小卫星按 GJB1032-90 所规定的地面力学环境试验中, 并取得了预期的效果, 该方法可应用于其他卫星振动夹具的设计中。

**关键词:** 振动夹具; 动特性; 光学小卫星; 力学环境试验

**中图分类号:** O324; TB302.3; TG75; V412.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-0043-06

## Design and analysis of dynamic characteristics of the optical satellite vibration fixture

Yan Yong<sup>1,2</sup>, Yao Jinsong<sup>1,2</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun 130033, China)

**Abstract:** As the power transmission components of the vibration test of the satellite, the stand or fall of fixture performance directly affect the authenticity and reliability of the vibration test. The general design method of satellite vibration fixture was summarized, and a vibration fixture design work for a certain satellite was done very well. The dynamic characteristics of vibration fixture, such as the stiffness, quality and the natural frequency and dynamic response, were studied by using the finite element software MSC. NASTRAN. The analysis results shows that mean deviation of the dynamic characteristic response is about 6%, the maximum response deviation is about 11%. It is a reasonable range that the vibration fixture impact on the entire satellite dynamic characteristics. Now the vibration fixture has been successfully applied to the ground mechanics environmental test of a certain satellite which according to the mechanics experiment environment standard of GJB1032-90, and the expected results has been achieved. The method can also be applied to other satellite vibration fixture design process.

收稿日期: 2014-10-10; 修订日期: 2014-11-15

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121502)

作者简介: 闫勇(1981-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事空间光学遥感器光机结构设计及星载一体化方面的研究。

Email: clyy911@163.com

Key words: vibration fixture; dynamic characteristics; small optical satellite; mechanics environmental test

## 0 引言

随着微纳技术、一体化多功能结构、空间即插即用、集成化综合电子等技术的发展和光学卫星设计思想的创新,卫星小型化趋势愈发明显,小卫星能力不断提升。

近年来,随着我国卫星技术的发展,轻小型卫星的发展呈现井喷之势,“北京-号”、“资源一号 02C 星”、“高分一号卫星”等光学小卫星的成功应用,驱动小卫星更快地向商业化、产业化发展,而利用商业现货技术和产品,通过创新的方式集成低成本、高性能的航天系统也成为未来小卫星尤其是光学小卫星发展的方向之一<sup>[1-2]</sup>。

苛刻的动力学发射环境是每个卫星所必需经历的重要过程,它主要发生在卫星的发射阶段,作用时间虽短,但其重要性不可忽视,同时对保证卫星的可靠性起着很大作用。

目前卫星动力学试验主要目的包括以下三个方面<sup>[3]</sup>:

(1) 验证卫星结构设计方案的正确性,考核卫星结构是否能承受可能遇到的动力学环境;(2) 暴露卫星在材料、元器件选择和制造装配过程中可能隐藏的缺陷,尽量减少它的早期失效率,提高工作可靠性;(3) 研究动力学环境对新材料和新结构的影响,研究各种隔振减振措施的有效性。

美国哥达德中心曾对早期发射的 57 颗卫星做过相关统计,在卫星发射第一天,星上发生的事故中,有 30%~60%是由于发射飞行过程中的振动环境所引起。

特别是对于光学小卫星而言,发射过程中振动动力学环境的影响更为明显,极易导致成像系统内部结构件的刚体位移或变形,影响系统成像质量,严重的可能导致整个光学系统失效,导致发射的失败。

对于近年来新近出现的利用商业现货技术和产品,通过创新方式集成的光学小卫星的成功发射并能正常工作而言,合理的设计,保证其成像性能的稳定及可靠性,确保星体传力路径的准确性,真实地反

应光学卫星的发射环境,并考验整星及其星上光学仪器经受该环境的能力成为当前光学小卫星动力学试验面临的一个问题。

试验中采用力限控制的想法由来已久,国外也已开展多年研究工作,但由于测量和实施的难度尚未普遍应用。对于目前新兴的货架型商业小卫星而言,从成本控制或是技术实施上都是一个难题,其商业化的应用有待进一步考核确认。

在现有技术条件下,合理进行光学卫星发射前的地面力学环境试验,避免振动过程中过试验或欠试验的现象,正确反映卫星动力学特性意义重大。

## 1 夹具设计原则及基本形式

### 1.1 卫星力学试验夹具设计原则

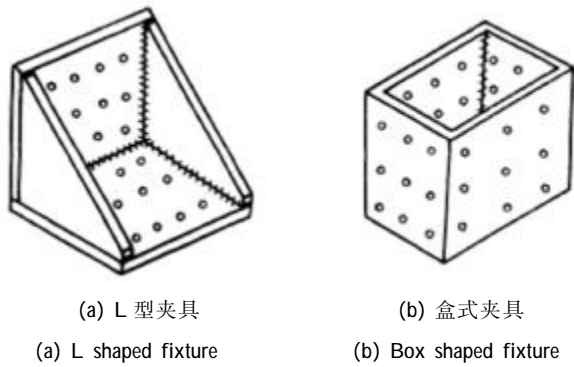
夹具是卫星振动试验的传力部件,通过它振动台将其运动传递给卫星适配器,使整星在规定的振动量级下得到考验,夹具性能的好坏直接影响到振动试验的真实性和可靠性,严重地可导致错误的试验结果或试验失效。

整星夹具设计的基本原则如下<sup>[4-5]</sup>:

(1) 夹具应具有尽可能高的固有频率,且频率响应曲线应平坦,具体实施中一般要求夹具一阶固有频率至少比整星固有频率高 3~5 倍;(2) 夹具连接面上各点响应要一致,以确保振动输入的均匀性;(3) 夹具的横向振动应尽量小;(4) 在振动台推力允许的范围,夹具质量一般取试验产品质量的 2~4 倍,以减少试件对振动台的反共振;(5) 正确模拟试件的实际安装状态,重现产品的实际工作环境。

### 1.2 卫星力学试验夹具基本形式

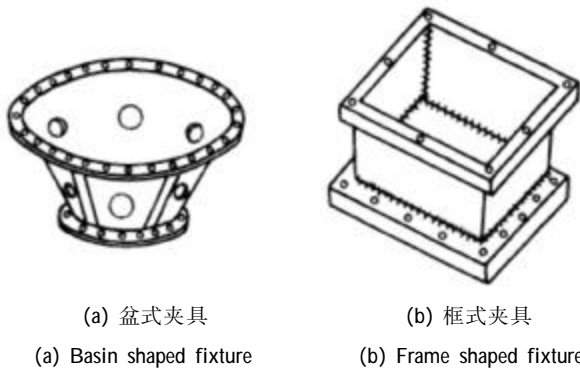
卫星及组件振动试验常用夹具按其适用振动方向的不同可分为三向和单向试验夹具两类。L 型和盒式夹具适用于三向的安装和试验,盆式和框式夹具适用于大型的或不能横放的试件的竖直安装,并借助水平滑台实现其他方向的试验,常用三向振动试验夹具具体形式如图 1 所示,常用单向振动试验夹具具体形式如图 2 所示<sup>[6]</sup>。



(a) L型夹具 (b) 盒式夹具  
(a) L shaped fixture (b) Box shaped fixture

图1 常用三向振动试验夹具

Fig.1 Commonly used three-dimensional vibration fixture



(a) 盆式夹具 (b) 框式夹具  
(a) Basin shaped fixture (b) Frame shaped fixture

图2 常用单向振动试验夹具

Fig.2 Commonly used one-dimensional vibration fixture

在整星振动夹具设计时重点应考虑其结构刚度、质量和固有频率,包括它们之间的相互关系<sup>[7-8]</sup>。

由于受到振动台推力限制,很难将夹具刚度设计的足够高,因此在实际操作中需对试验所需推力进行预估,即将试验系统(试件、夹具和振动台动圈)视为刚体,计算所得试验所需推力如公式(1)所示。

$$F=(m_1+m_2+m_3)a \quad (1)$$

式中: $m_1$ 为动圈质量(若使用滑台还应包括滑台质量); $m_2$ 为夹具质量; $m_3$ 为试件质量; $a$ 为试验中试件所需的加速度均方根值。

上述计算结果只是一个估算,通常需加一定的余量,按经验  $F$  通常需要乘以一个系数 1.2。

## 2 某卫星振动试验夹具设计

某光学小卫星与运载之间采用  $\varnothing 660\text{ mm}$  型包带连接解锁装置进行连接,振动台拟采用 40 t 大推力水冷式电动振动台,整星重量约 400 kg,星上设备均采用商业现货技术和产品,为避免过试验或欠试验的发生,需对卫星发射前的地面力学环境试验进

行严格控制,其振动试验夹具的设计是其中的重点。

为真实模拟光学卫星与运载的包带连接方式,该夹具利用两半圆对接环压块实现振动工装与整星对接环的连接,夹具为铸铝盆式结构,其结构形式如图 3 所示,该夹具共底座、对接环压块 L 和对接环压块 R 三部分组成,其中两个对接环压块与底座分别通过 8 个 M16×80 的内六角头螺栓连接。

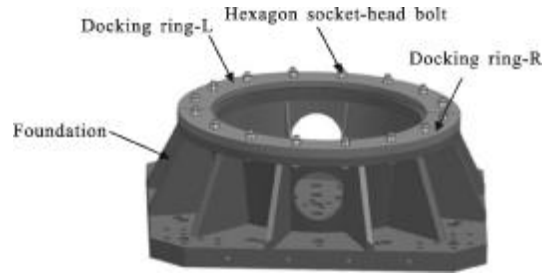


图3 某卫星振动试验夹具

Fig.3 Vibration fixture of the satellite

振动试验夹具底座采用球墨铸铁 QT600-3 铸造成型,该种合金具有强度高、加工后表面光洁度高、铸件尺寸稳定性好等优点,对接环压块 L 和对接环压块 R 采用 45# 钢,其主要材料属性如表 1 所示,夹具总质量 865.3 kg,其中底座 758.0 kg。

表 1 主要材料属性

Tab.1 Main material properties

Material	Density $\rho/10^{-4}\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$	Elasticity modulus E/GPa	Poisson's ratio $\mu$
QT600-3	7.30	157	0.270
45	7.85	210	0.269

振动夹具与卫星适配器连接方式如图 4 所示。



图4 振动夹具与卫星适配器连接方式

Fig.4 Connection form between vibration fixture and satellite adapter

试验所需推力  $F \approx [(400+865.3+300) \times 6] \times 1.2 = 112.7\text{ kN}$ ,可满足振动台使用要求。

利用有限元软件 MSC.NASTRAN 建立了有限元模型,并对振动夹具模态进行了分析,其一阶模态 1 037 Hz。

### 3 某卫星振动试验夹具动特性分析

#### 3.1 模态分析

在整星试验频率范围内,为避免振动夹具与整星发生共振,影响整星试验性能,对带振动夹具的整星进行了模态分析,其 FEM 模型如图 5 所示,表 2 所示为某卫星带振动夹具前后整星前 5 阶自然谐振频率对比情况,由表 2 中相关数据及阵型对比可知,该夹具对某光学小卫星的自然谐振频率影响不大,阵型一致,基本上可真实反映某卫星的刚度特性<sup>[9]</sup>。

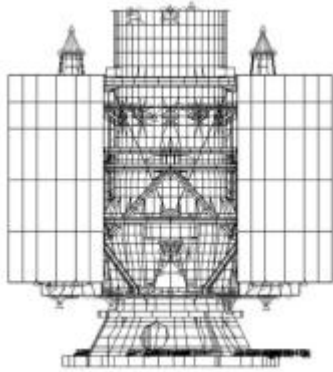


图 5 带振动夹具的某卫星 FEM 模型

Fig.5 A satellite FEM mode with vibration fixture

表 2 带振动夹具前后整星前 5 阶自然谐振频率对比表  
Tab.2 Five order natural frequency comparison table with or without the vibration fixture

Natural frequency order	1	2	3	4	5
Frequency with vibration fixture/Hz	30.26	32.27	38.65	39.90	43.99
Frequency without vibration fixture/Hz	30.80	32.80	38.9	40.2	44.30

#### 3.2 振动响应特性分析

在模拟某光学小卫星与运载连接的边界条件下,为使某光学小卫星在试验频率范围内,整星振动夹具尽可能具有平坦的传递特性,以避免产生过试验或欠试验的问题<sup>[10]</sup>,利用有限元法分别对某光学小卫星带振动工装前后整星随机振动和正弦振动响应特性进行了对比分析,星上设备安装面随机振动响应特性如表 3 所示,星上设备安装面正弦振动响应特性如表 4 所示,从表 3 和表 4 对比分析可知,带

振动夹具后整星动特性响应平均偏差约为 6%,最大响应偏差约为 11%,振动夹具对整星动特性影响在合理范围内<sup>[11]</sup>。

表 3 星上设备安装面随机振动计算结果

Tab.3 Random vibration calculation results of onboard equipment installation surface

Equipment ID	Without vibration fixture			With vibration fixture		
	1-X(g <sub>rms</sub> )	1-Y(g <sub>rms</sub> )	1-Z(g <sub>rms</sub> )	1-X(g <sub>rms</sub> )	1-Y(g <sub>rms</sub> )	1-Z(g <sub>rms</sub> )
Input point	7.080	7.080	7.956	7.080	7.080	7.956
Respond of the monitor point	-	-	-	7.526	7.315	8.552
Equipment -1	5.306	4.935	12.13	5.469	4.921	10.10
Equipment -2	5.401	5.087	14.08	5.502	5.377	12.94
Equipment -3	5.029	5.051	11.42	5.075	5.099	12.17
Equipment -4	5.748	5.227	11.78	6.152	5.398	10.85
Equipment -5	4.958	4.809	10.93	5.010	4.718	12.23
Equipment -6	4.942	4.797	12.77	4.976	4.735	14.05
Equipment -7	4.975	5.778	11.21	4.957	6.054	10.49
Equipment -8	4.992	5.420	10.50	5.022	5.589	9.897
Equipment -9	5.123	6.314	7.828	5.449	6.949	7.788
Equipment -10	7.900	7.947	8.647	7.939	7.795	8.948
Equipment -11	9.450	11.44	6.599	9.517	11.42	7.061

表 4 星上设备安装面正弦振动计算结果

Tab.4 Sinusoidal vibration calculation results of onboard equipment installation surface

Equipment ID	Without the vibration fixture			With the vibration fixture		
	1-X(g)	1-Y(g)	1-Z(g)	1-X(g)	1-Y(g)	1-Z(g)
Input point	0.9	0.9	1.05	0.9	0.9	1.05
Respond of the monitor point	-	-	-	0.93	0.91	1.09
Equipment -1	13.5	17.5	7.5	13.8	18.0	8.6
Equipment -2	15.5	15.0	10.0	15.5	15.0	10.0
Equipment -3	14.5	19.5	14.5	14.0	19.0	14.5
Equipment -4	15.0	14.5	10.5	15.5	14.5	11.0
Equipment -5	14.5	17.5	12.5	14.5	17.6	12.5
Equipment -6	13.5	17.5	11.0	14.0	17.6	11.5
Equipment -7	14.5	17.2	11.0	14.0	17.5	11.5
Equipment -8	14.5	17.5	13.0	15.0	17.6	14.0
Equipment -9	15.5	16.5	13.0	15.0	17.0	13.5
Equipment -10	21.5	24.0	31.0	21.0	24.0	30.0
Equipment -11	26.0	23.0	20.0	25.5	23.5	20.5



整星地面环境试验时,其振动控制点的安装位置选在夹具与对接环安装孔附近,采用多点平均控制的方法对整星与对接环连接端面振动量级进行合理控制,可进一步真实模拟卫星适配器部位运载给定振动量级,以满足某卫星地面振动试验应用需求,避免过试验或欠试验的发生,图6所示为已应用于某光学小卫星地面振动试验夹具。

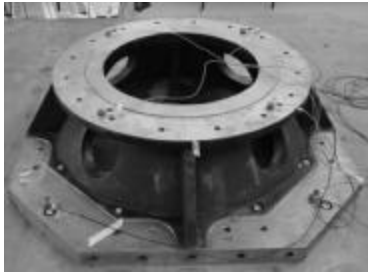


图6 某卫星地面振动试验夹具

Fig.6 Ground vibration test fixture for the satellite

光学小卫星振动夹具设计主要包括夹具刚度特性的优化设计及振动动特性优化两部分内容,夹具优化设计的具体流程如图7所示。

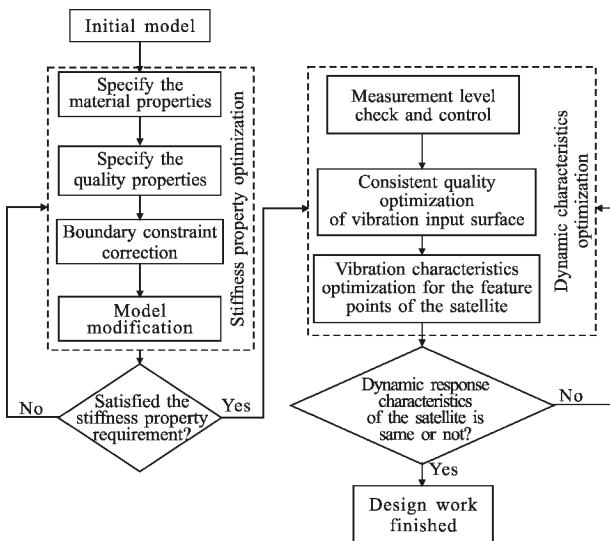


图7 夹具优化设计流程

Fig.7 Optical satellite vibration fixture optimization design process

## 4 结论

近年来随着一批利用商业现货技术和产品,通过创新的方式集成的光学小卫星的成功发射,驱动小卫星更快地向商业化、产业化发展,如何在现有技术条件下,合理进行卫星发射前的地面力学环境试验,保证其成像性能的稳定及可靠性,确保星体传力

路径的准确性,真实地反应光学卫星的发射环境,避免振动过程中过试验或欠试验的现象,正确反映卫星动力学特性意义重大。

夹具是卫星振动试验的传力部件,夹具性能的好坏直接影响到振动试验的真实性和可靠性。文中从卫星振动夹具设计的角度总结了卫星振动夹具设计的一般方法和思路,并针对某光学小卫星夹具设计要求,依照上述思路开展了相关设计工作。文中利用有限元软件 MSC.NASTRAN 对所设计的卫星振动夹具的动特性进行了分析,并研究了该夹具结构刚度、质量属性、结构固有频率以及夹具振动响应特性之间四者之间的关系,通过结构设计及动特性优化,完成了该光学小卫星振动夹具的设计工作。该光学小卫星带振动夹具前后整星动特性响应平均偏差约为6%,最大响应偏差约为11%,从相关分析数据看,振动夹具对整星动特性影响在合理范围内,地面试验进一步验证了该振动夹具的合理性,目前该振动夹具已成功应用于某光学小卫星按 GJB1032-90 所规定的地面力学环境试验中,并取得了预期的效果。该振动夹具设计的一般思路和方法可应用于其他卫星振动夹具的设计中。

## 参考文献:

- [1] Zhang Jungang, Pang Hewei. The force limited control technique in vibration test [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(5): 253-256. (in Chinese)  
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.
- [2] Guo Rongping, Duan Wenying, Shi Jun. Design and test of a fixture for random vibration testing of electronics installed in aircraft [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1997, 17(1): 50-54. (in Chinese)  
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): 50-54.
- [3] Cheng Zhifeng, Fu Bihong, Yang Genqing. Vibration test technology for microsattellites [J]. Noise and Vibration Control, 2005, 8(5): 56-59. (in Chinese)  
陈志峰, 付碧红, 杨根庆. 微小卫星振动试验技术 [J]. 噪声与振动控制, 2005, 8(5): 56-59.
- [4] An Changnuan, Zhao Hongyang, Zhang Zunwei, et al. Design and analysis of vibration tong for EO equipments [J]. Electro-optic Technology Application, 2004, 19 (6): 50-54.

- (in Chinese)  
安长暖, 赵洪阳, 张尊伟, 等. 光电设备振动夹具的设计探析[J]. 光电技术应用, 2004, 19(6): 50-54.
- [5] Li Wei. Design and research of vibration tong for space optical remote sensor [J]. OEM Information, 2010, 27(9): 16-22. (in Chinese)  
李威. 空间光学遥感器振动夹具的设计与研究[J]. 光机电信息, 2010, 27(9): 16-22.
- [6] Ke Shouquan. Satellite Environment Engineering and Simulation Test [M]. Beijing: China Aerospace Press, 1996. (in Chinese)  
柯受全. 卫星环境工程和模拟试验 [M]. 北京: 宇航出版社, 1996.
- [7] Liu Qinglin, Zhu Xuewang, Zhang Sijian. Pushing force estimation of random vibration test considering dynamic characteristics of test specimen and fixture [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 52-55. (in Chinese)  
刘青林, 朱学旺, 张思箭. 考虑试件与夹具动力学特性的随机振动试验推力估算[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 52-55.
- [8] Li Yanhui, Deng Weihua, Wang Xiaoheng. The thrust evaluation for satellite vibration test [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(2): 160-164. (in Chinese)  
李艳辉, 邓卫华, 王晓耕. 卫星振动试验中推力的估算方法[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(2): 160-164.
- [9] Zhou Linzhen, Wang Xinmin. Random vibration response analysis of the fixture [J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science), 2003, 16(1): 43-45. (in Chinese)  
周临震, 王新民. 夹具强迫随机振动响应分析[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2003, 16(1): 43-45.
- [10] Ding Li, Wang Xiaoqing, Wei Ming. Study on random vibration testing technique in engineering applications [J]. Aeronautical Computer Technique, 2002, 32(3): 110-113. (in Chinese)  
丁力, 王小青, 尉明. 工程应用中的随机振动试验技术研究[J]. 航空计算技术, 2002, 32(3): 110-113.
- [11] Fan Xuanhua, Hu Shaoquan, Wang Dongsheng, et al. Random vibration test simulation of an electrodynamic vibration generator based on finite element methods[J]. Noise and Vibration Control, 2008, 4(5): 41-43. (in Chinese)  
范宣华, 胡绍全, 王东升, 等. 电动振动台随机振动试验有限元仿真[J]. 噪声与振动控制, 2008, 4(5): 41-43.