文章编号：1007-1180(2011)07-0059-05

大型空间遥感器动力学试验

刘忠臣，朱延江
（中国科学院　长春光学精密机械与物理研究所，吉林　长春　130033）

摘　要：大型空间遥感器结构复杂、重量大，在研制过程中，给地面动力学环境试验工装的设计带来很大的困难。振动工装是振动试验的传力部件，将振动台与遥感器连接起来，其性能直接影响到振动试验的真实程度和可靠程度。本文论述了遥感器振动工装研制及动力学试验过程。正弦振动和随机振动结果表明，振动台的振动输入条件与工装对遥感器的输入条件基本一致，说明振动工装没有对具体的输入条件进行明显的放大和缩减，完全反映了大型空间遥感器振动测试真实条件，验证了振动测试的有效性。

关键词：大型空间遥感器；振动工装；结构设计；工程分析
中图分类号：TH703.3　　**文献标识码**：A
DOI：10.3788/OMEI20112807.0059

Dynamic Experiment of Large Space Remote Sensor

LIU Zhong-chen, ZHU Yan-jiang
(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

Abstract: Large space remote sensor's structure is very complex, and it's weight is heavy. In development process, the design of fixture is a difficult work. The fixture is a force transmission component in vibration tests, which connecting the shaking table and the remote sensor directly. Its performance will affect the reliability of the vibration test. The development of the fixture and the vibration test process was discussed in this paper. Sine vibration and random vibration results showed that the input from the fixture consistent with shaking table. Test results indicated that the fixture did not amplify and shrink the input conditions obviously, which verified the effectiveness of vibration test.

Keywords: large space remote sensor; vibration fixture; structure design; engineering analysis

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1 引 言

大型空间遥感器结构复杂、重量大，它在研制的同时，也给地面动力学环境试验工装的设计带来很大的困难。动力学环境试验是空间遥感器研制工作的重要组成部分，与遥感器在轨飞行中所受的各种环境相比，动力学环境具有完全不同的特点。它主要发生在卫星的发射阶段，作用时间虽短，但重要性不容忽视。动力学环境试验是遥感器环境试验大纲列入的不可缺少的部分，对保证遥感器的可靠性起着很大作用。振动工装是将振动台与遥感器连接起来的重要环节，是振动试验的传力部件，它把振动台的运动传递给遥感器，使遥感器在规定的振动量级下得到考验[1]。振动工装的性能直接影响到振动试验的真实程度和可靠程度。如果振动工装选择不当，在试验频率范围内工装本身将产生共振，使遥感器承受不应有的过大载荷而破坏，从而使试验得到错误的结果，甚至会造成遥感器结构损坏。因此，合理地设计大型空间遥感器振动工装是遥感器结构研制过程中一项极其重要的工作。

2 空间遥感器动力学试验

动力学试验是遥感器研制过程中的重要组成部分，它主要是针对发射阶段对遥感器所受的动力学环境进行仿真，虽然作用时间较短，但其重要性不可忽视，它对保证遥感器的可靠性起着很大作用。遥感器及其分系统振动试验是指在试验台进行的试验，主要模拟火箭飞行过程中产生的振动环节，描述振动特性的环境规范一般以频域和振动量级载荷表示。

在遥感器结构系统的研制阶段，动力学环境试验的主要目的是：

（1）验证遥感器设计方案的正确性，考核遥感器是否能承受可能遇到的动力学环境；

（2）暴露遥感器在材料、元器件选择和制造装配中可能存在隐藏的缺陷，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。

2.1 振动试验项目

模拟振动环境的振动试验主要有低频正弦扫描和随机振动试验，二者很类似，只是控制系统不同。但他们又各有其用途和特点，不能相互代替，随机振动试验的优点是补充正弦扫描试验的不足。

2.1.1 低频正弦扫描式试验

低频正弦扫描式试验是利用振动台产生的正弦运动输入到试验产品上，正弦振动的频率按倍频程连续变化，并能控制振动载荷。正弦扫描是以模拟瞬态振动为主，试验频率一般为 10~100 Hz，加载时间以每分钟倍频程数表示。因为振动响应具有三向性，所以试验方向为遥感器的相互垂直的 3 个方向，试验载荷谱按卫星的飞行特征确定。在试验台上安装试验产品时要注意实际的边界条件（如产品的支架及其连接形式等）。通常来说，试验载荷控制点的位置需加在整体结构上，试验中要在产品上安装振动传感器，测量振动响应参数。

2.1.2 随机振动试验

随机振动试验主要模拟噪声引起的振动，试验频率为 20~2 000 Hz，试验方向为产品相互垂直的 3 个方向，试验载荷为等效噪声引起的。试验产品安装的边界条件、控制点以及参数测量参考低频正弦扫描形式或等同于此。由于随机振动试验中各种频率产生的共振同时呈现，所以它是暴露产品故障和缺陷的重要手段，常被引用到产品的验收试验。

2.2 试验步骤与结果分析

2.2.1 模态测试

理论分析结果和有限元分析所得的模态分析结果最终都要通过动力学实验来加以验证，即遥感器结构系统能否达到设计要求，要由实际的结构动力学实验来鉴定验收。经理论分析和有限元分析论证，遥感器结构系统具有很明显的刚度薄弱方向，在振动试验中，可以直接进行模态测试，这符合“卫星环境工程和模拟试验要求”，这种模态测试法可以避开繁琐的多自由度模态参数辨识和数据处理阶段，

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

简单、可靠，可以有效地节省试验硬件资源。

现有的实验振动台（如电磁振动台）大多只能对3个轴向模态进行扫描，所以试验时不针对旋转方向的模态。实验时采用0.2 g的正弦扫描激励对系统的3个轴向进行扫描激振，测得共振点，作为系统的固有频率。

2.2.2 低频正弦扫描试验和随机振动试验

振动环节最主要的考察对象是柔性环节的可靠性问题，它包括两个方面：残余变形问题（塑变）和累计损伤问题（以每个加载循环导致的材料内部损伤的积累，当损伤的积累达到极限时元件破坏）。

对试验后反射镜上的多点基准进行测量，检测振动后反射镜的位置度误差，如仍在光学系统成像要求以内，并且各支撑元件也未破坏，说明反射镜各支撑结构、大型遥感器整体结构设计和有限元强度分析合理有效。

3 大型空间遥感器振动工装设计基本原则

为了保证频率响应曲线平坦，大型空间遥感器振动工装固有频率要高，至少要高于试件频率的3~5倍，以避免试件和工装的耦合振动；并且工装的连接面上各点响应要一致，以确保振动输入的均匀性。因此，大型空间遥感器振动工装设计应考虑以下两点：

（1）对于电磁振动台，为了保证正常启动及连续振动，不仅对振动的有效载荷有严格的限制，而且对倾覆力矩也有较严格的限制。倾覆力矩是指由于振动载荷尺寸较大，其质心由于不均匀性不能完全落在振动台的中心，给振动台造成附加的动态外力矩，即：

$$M=\Delta X\cdot G \tag{1}$$

其中，M为附加力矩，ΔX为偏心距，G为遥感器重量。

在振动台启动瞬间，这个附加的动态外力矩会给振动台造成一种冲击，如下式：

$$M_\delta=\delta\Delta X\cdot G \tag{2}$$

M_δ为瞬间冲击载荷，其中δ为冲击系数，一般为70~80。

这个冲击会对振动台的轴承带来破坏性的影响，在此情况下，振动台会自动检测、反馈并启动保护系统，使振动台停止振动。这时，如果对振动台强行启动，振动台将会造成永久性破坏。由于大型空间遥感器结构复杂、外形尺寸较大，在进行振动工装设计时，必须充分考虑倾覆力矩对振动台造成的影响，尽量保证遥感器质心落在振动台的中心。

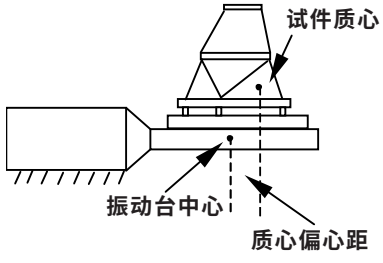

图1 遥感器安装的偏心性

（2）由于遥感器重量750 kg的不变性，振动台的最大有效载荷重量为1 000 kg，因此振动工装极其附属零部件的重量应严格限制在250 kg以内。由于振动工装的重量限制很严，在对振动工装进行轻量化设计的同时，对其动态刚度、静态刚度的设计要引起充分的重视。首先，遥感器固定到工装上时，工装不得在光轴方向上产生超过遥感器所引起的变形公差，以免对遥感器产生破坏；其次，由于遥感器的一阶固有频率在70 Hz左右，根据系统要求，振动工装的一阶固有频率应该>210 Hz；最后，工装自身应具有可吊装性，固定应灵活，不得与遥感器及外界其他因素干涉[2]。

4 大型空间遥感器振动工装结构设计

根据振动工装系统要求和基本要求，进行了详细的结构设计：

（1）大型空间遥感器振动工装自由度分析。振动工装先通过较多的螺钉与振动台连接，再将遥感器的6个连接座与振动台采用螺钉与销钉固定到一

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

起，从而实现了工装、遥感器的6个自由度的全部约束[3]。

（2）大型空间遥感器振动工装外形设计。工装的外形设计应比遥感器稍大，同时由于遥感器的质心偏外，在工装设计时，有意识地将其重量向内侧偏置，以补偿遥感器偏心造成的外力矩，增加动平衡的可靠性。工装的内部采用中空设计，并用加强筋板连接，既降低了重量，又增加了刚度。

（3）大型空间遥感器振动工装吊装的安全可靠性。在工装的4个角点设置安装吊环，这样，在吊装时，可以始终保持工装水平；另外，由于遥感器与工装分布安装，更增加了安装的可靠性[4]。

（4）大型空间遥感器振动工装铸造工艺可行性。由于采用中空设计，加强筋的厚度较大，而且大部分结构尺寸均匀，所以给浇注、清沙带来极大的方便，而且不会产生微裂纹等严重的缺陷。图2为大型空间遥感器振动工装结构。

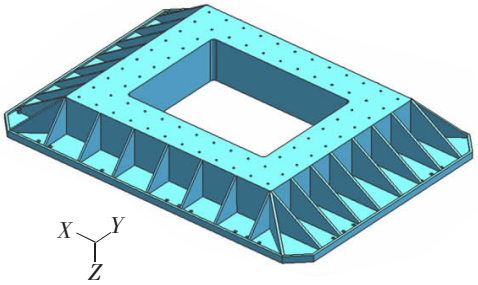

图2 大型空间遥感器振动工装结构

5 大型空间遥感器与振动工装耦合分析

在遥感器和工装设计都完成的情况下，对整个系统进行合理的工程分析，找到不合理因素，并对结构进行改进。经过多次的分析、优化设计，最终工程分析的结果如表1所示。

通过表1可知，在整个系统下，工装的轴向最大变形为0.01 mm，即工装在遥感器重力作用下，其安装面的最大不平度在0.01 mm以内，完全满足遥感器的公差要求。整个系统的一阶模态为68 Hz，与遥感器的一阶模态71 Hz相比较，仅仅降低了3 Hz，工程分析结果表明振动工装设计合理、可靠。

表1 振动工装分析结果

状态	轴向重力变形		模态分析	
	分析结果 (mm)	公差要求 (mm)	分析结果 (Hz)	遥感器 (Hz)
结果	0.01	0.05	68	71

6 大型空间遥感器振动工装试验验证

在遥感器研制进度的安排下，对遥感器进行了振动测试，如图3和图4，其遥感器一阶模态测试结果为65 Hz，与分析结果相近。经过测试，遥感器和工装都没有发生破坏。表2中正弦振动和随机振动结果表明，振动台的振动输入条件与工装对遥感器的输入条件基本一致，说明振动工装没有对具体的输入条件进行明显的放大和缩减，完全反映了

图3 大型空间遥感器振动工装吊装

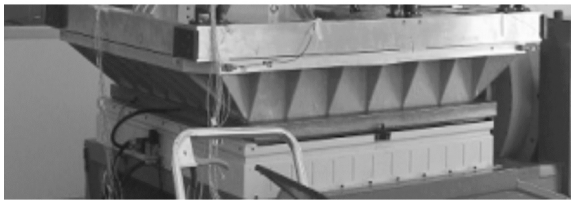

图4 大型空间遥感器振动测试

表2 正弦振动和随机振动测试结果

系统模态：Hz	正弦振动工装放大倍率	随机振动工装放大倍率
65	1.08	1.05
全部满足系统要求		

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

实际振动条件，说明大型空间遥感器振动测试数据真实可靠，符合卫星对遥感器的考核。

7 结 论

大型空间遥感器振动工装设计的高安全性、高可靠性是大型空间遥感器研制过程中极其重要的一环，在整个遥感器研制过程中起着不可替代的作用。本文详细论述了大型遥感器动力学试验的项目以及振动工装设计中应注意的问题，并设计了大型遥感器的振动工装。试验测试表明，采用该振动工装的大型遥感器动力学试验完全反映了实际振动条件，振动测试数据真实可靠。它的成功研制不仅保证了大型空间遥感器的研制进度，同时也给其他大规模遥感器振动工装的研制奠定了基础，积累了宝贵的经验。

参考文献

[1] 柯受全. 卫星环境工程和模拟试验下[M]. 北京：中国宇航出版社，1996.
[2] 朱延江，王爽，袁庆忠. 空间相机横向振动工装拓扑优化设计[G]. 长春光机所内部交流文集，2009：125-129.
[3] 王延风，卢锷，宋文荣，等. 空间相机的结构动力学分析[J]. 光学 精密工程，2003，11(4)：50-55.
[4] 罗震，陈立平，黄玉盈，等. 连续体结构的拓扑优化设计[J]. 力学进展，2004，11(4)：463-476.

作者简介：刘忠臣（1969-），男，吉林长春人，学士，副研究员，1992年于南京林业大学获得学士学位，主要从事环境试验技术、试验方法的研究。E-mail：zcliu1969@163.com

《液晶与显示》 (双月刊)

《液晶与显示》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办，科学出版社出版。

●中国最早创办的液晶学科专业中文核心期刊

●中国唯一的液晶学科和显示技术领域中综合性学术期刊

●中国光学光电子行业协会液晶分会会刊，中国物理学会液晶分会会刊

●英国《科学文摘》（SA）、美国《化学文摘》（CA）、俄罗斯《文摘杂志》（РЖ）、美国《剑桥科学文摘》（CSA）、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》征集有关液晶和各类显示材料及制备方法、液晶显示、等离子体显示、阴极射线管显示、发光二极管显示、有机电致发光显示、场发射显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他显示、各类显示器件物理和制作技术、各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用、显示材料和器件的测试方法与技术等研究论文。《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用，踊跃投稿。同时，竭诚欢迎社会各界洽谈广告业务、合作组织技术交流与信息发布活动。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域中最新理论研究、科研成果和创新技术，及时反映国内外本学科领域及产业信息动态，是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果，进行国际交流的平台。其内容丰富，涵盖面广，信息量大，可读性强，是我国专业期刊发行量最大的刊物之一。

网址：http://www.yjyxs.com 欢迎访问！

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net