

文章编号 1004-924X(2001)02-0174-03

空间光学组件的动力学环境试验

王建设

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 动力学环境是空间光学遥感器及其组件研制中不可忽视的一个重要因素,因为它会对整机或组件造成结构性的破坏,所以在其研制的不同阶段须进行充分的动力学环境试验。空间光学系统是执行重要任务的子系统,在结构及其性能、工作精度要求、密封性、可靠性等方面均有比较特殊的要求。组件乃至系统不仅须经历动力学环境试验的严格考核,而且还须在此基础上通过其它相关试验做进一步的测试。针对空间光学组件及系统的特点和要求,对各种因素进行了综合研究并编制了各类组件的动力学环境试验大纲。同时,对试验中的控制、监测、试验夹具、安全等诸方面的技术实施做了分析和探讨。

关键词: 空间光学组件; 动力学环境; 试验

中图分类号: TP72 **文献标识码:** A

1 引言

空间光学系统作为一个有效载荷,由遮光罩组件、窗口组件、相机主体、控制箱等部分组成。这些组件具有各自的功能,分别布置在舱体的不同空间位置上,形成一个整体。其在运输、发射、进入工作状态等各个阶段,会经受声、振动、冲击和加速度等各种形式的动力学环境。动力学环境与在轨道运行中的空间环境相比有着完全不同的特点,它主要发生在发射与主动阶段,其作用时间短,动力学载荷对空间光学组件的影响不容忽视。为了保证整机及其组件在可能遇到的动力学环境中能够正常工作,在精心设计、制造、装配的基础上,均须对其进行充分的动力学环境试验,其目的在于对组件和整机进行结构设计、材料和元器件选择、制造装配隐患、隔振减振措施、新结构新材料等方面进行考核和验证。空间光学元件的镜面变形和光学元件间的相对尺寸的变化是影响成像质量和分辨力的一个重要因素,因此,在研制的各个阶段需要考核组件、系统抵抗动力学环境载荷的能力。通常研制过程分为初样阶段和正样阶段,动力学环境试验分为鉴定级和验收级。

2 环境载荷与模拟试验

2.1 加速度环境试验

在发射阶段,由发动机的推力使飞行器获得加速度,即

$$F(t) = m(t)a(t) \quad (1)$$

式中: $F(t)$ —— 发动机推力矢量;

$m(t)$ —— 飞行器质量;

$a(t)$ —— 飞行器的加速度矢量。

加速度环境主要是压缩载荷,沿着发动机的推力方向(即纵向 y 向),对光学组件来说可能引起结构破坏或失稳,密封光学窗口泄漏,传动装置失灵以及线路板、电子元器件松动脱落等现象。所以,在 x, y, z 三个方向均进行加速度环境试验, y 向的加速度试验量级大于 x, z 方向的量级。

2.2 正弦扫描振动试验

在运输、发动机工作等过程中,来自发动机不稳定燃烧而产生的推力脉动变化,旋转设备的不平衡转动,相关结构和系统间的共振频率耦合等因素是正弦激励,将引起结构的低频正弦振动,其频率范围一般在 $5\text{Hz} \sim 100\text{Hz}$ 。低频正弦振动可诱发光学系统整机或组件的共振,严重的会造成结构破坏或使光学元器件相对位置发生不可恢复的变化。加载方向为 x, y, z 三个方向。正弦扫描振动试验的例子见图 1。

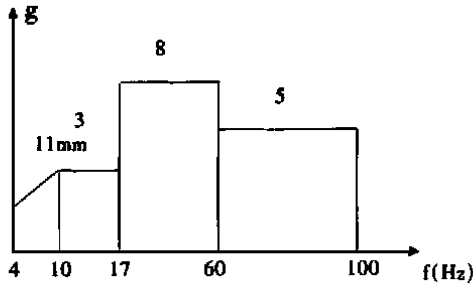


Fig 1 Experiment condition of sine vibration

2.3 随机振动试验

来自起飞喷气噪声和飞行过程中的气动噪声将是随机振动激励的主要因素, 起飞喷气噪声由发动机排气涡流产生, 其频率范围一般为 $20\text{Hz} \sim 2000\text{Hz}$ 。气动噪声的频率高达 10kHz 。另外, 地面运输环境也是一种频率较低的随机振动激励, 其频率范围一般为 $0.5\text{Hz} \sim 100\text{Hz}$ 。随机振动可以导致光学组件局部高频抖动, 使在地面装调好的光学系统精度遭到破坏。试验谱形及量级以表格或加速度功率谱密度曲线形式给出, 典型形式如图 2 所示。

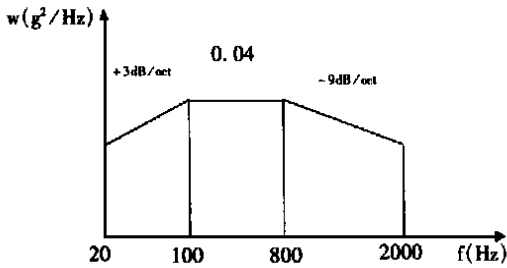


Fig 2 Experiment conditions of random vibration

2.4 冲击试验

在飞行过程中, 当飞行器和运载火箭分离、舱段分离、火工装置在工作时产生时间极短的冲击载荷, 在地面运输中和吊装过程中, 也会受到碰撞式的冲击载荷。相对来说, 质量较小的光学组件远比质量较大的组件易受较大的影响, 甚至会造成破坏。在冲击试验中, 一般用绝对加速度谱表明系统所经受的力。冲击谱试验条件见图 3 所示。

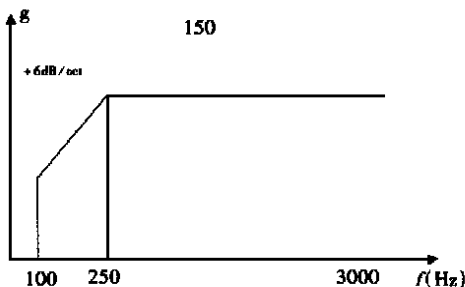


Fig 3 Experiment condition of shock

3 光学组件和系统动力学环境试验中的关键技术

3.1 振动试验台

振动试验台的选用应考虑下列因素:

(1) 频率范围应满足试验条件的上下限频率要求。

(2) 需用推力 F_T 为

$$F_T = m a \quad F_0 \quad (2)$$

其中: F_T ——试验需用推力, N ;

m ——试件、夹具、振动台台面、动框组成的运动系统总有效质量, kg ;

a ——试验规范给定的最大加速度, m/s^2 ;

F_0 ——振动台的额定推力, N 。

(3) 根据试验条件计算出的最大位移应小于振动台的最大额定位移, 即

$$D = \frac{250a}{f^2} \quad D_{\max} \quad (3)$$

其中: D ——计算出的最大位移, mm ;

f ——与加速度对应的频率, Hz ;

D_{\max} ——电动振动台给定的最大位移, mm 。

3.2 光学组件的安装与固定

试件通过夹具与振动台台面连接, 或直接与振动台台面连接, 应能模拟试件的实际安装情况。夹具本身应有足够高的刚度, 保证将振动台台面的运动传递给试件, 因此, 夹具的设计要考虑结构型式、尺寸、材料、固有频率、连接面、螺栓等因素。夹具的第一固有频率 f_{jie} 要高于试件的第一固有频率 f_{obj} 的 3~5 倍, 即

$$f_{\text{jie}} \quad (3 \sim 5)f_{\text{obj}} \quad (4)$$

试件与夹具或试件与振动台台面的连接要牢靠, 接触面不宜过大, 连接孔处加工成凸台型式, 夹具连接面各点的响应力求一致。

光学组件通过平板夹具用螺栓或螺钉与振动台面连接, 平板夹具用铝合金材料制作, 结构、连接方式与实际安装情况一致。

3.3 环境激励的控制

为了保证对接面上各点的振级输入一致, 采用多点平均控制, 使对接面各点输入的平均值满足试验条件, 避免单点控制导致的某些频率的过试验或欠试验。平均控制的幅值由下式计算

$$A_1(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i(f) \quad (5)$$

式中: $A_i(f)$ ——第 i 点的加速度幅值;

N ——参加平均的控制点数;

$A_r(f)$ —— N 点平均的加速度幅值。
光学窗口组件试验沿对接面取 4 点平均,
即 $N = 4$ 。

3.4 试件的响应监测与下凹控制

在试件的重要部位设置监测点,用加速度计测量该处的加速度响应,速度响应或位移响应。空间光学遥感器整机试验是一个大型且重要的试验,在机身外侧、次镜座、主镜室和控制箱等处分别贴 3 个加速度计,来监测该处的响应值。

因为空间光学遥感器整机是非常重要的光学设备,所以在其关键部位贴加速度计,监控其加速度响应,使其不超过预先设定的环境预示值,以确保试验中试件的安全。通常,当试件的加速度响应 R_{obj} 大于预示值 R 的 10 倍时,须即刻采取下凹控制措施,即 R_{obj} 应满足

$$R_{obj} \leq 10R \quad (6)$$

参考文献:

- [1] 王建设 空间光学遥感器轨道外热流的计算与软件设计[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(6): 30- 35
- [2] 闵桂荣 卫星热控制技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1991.
- [3] 柯受全 卫星环境工程和模拟试验[C]. 北京: 宇航出版社, 1993
- [4] 王建设 空间光学遥感器轨道外热流的模拟[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(4): 328- 330

Environment experiment of dynamics of space optical subassemblies

WANG Jian-she

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: Dynamics environment is a very important factor for the development of space optics remote sensors because it can bring about damage to the structure of the equipment and its subassemblies. For this reason, environment experiments of dynamics have to be adequately carried out during its different stages of the development. The space optics remote sensor, being a subsystem for executing significant task, has special requirements for its structure, behavior, operating precision, seal, reliability and so on. The whole equipment as well as its subassemblies have to be not only strictly examined through dynamics environment experiments, but also should be tested by other relevant experiments. According to their characteristics and conditions, an experiment document was worked out for the equipment and its subassemblies, and some technique issues and measures concerning control of vibration, inspection of response, linking jig, fixing of object tested, safety precautions in the experiment were analyzed and discussed.

Key words: space optical subassemblies; dynamic environment; experiment

作者简介: 王建设 (1958-), 男, 博士, 山西省侯马市人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员, 主要从事数值模拟分析与计算机仿真技术, 工程分析, 有限元分析, 精密机械, 结构设计, 动压润滑, CAD/CAE, 软件开发, 空间光学工程热分析计算, 热设计和热试验等研究工作, 已发表论文 30 余篇。

3.5 试验前后检测

在动力学环境试验之前和之后均需对试件进行检验,并对试验前后的测试结果进行比较,根据试件无异常的判据进行判断。检测内容主要有外观检查、性能检验和特征测试等。

外观检查是观察试件是否有损坏、变形、松动及微观裂纹等。性能检验是对试件的精度、性能指标进行测试。

特征测试是评价试件振动试验后结构是否完好的一个重要方法,在正式振动试验前后分别以低量级的试验条件对试件进行激励,同时测量监测点的响应,比较前后两次试验的响应数据,分析其主要固有频率及其相应的共振峰值,合格判据一般是,其主要峰值响应频率 f_r (当 $f_r < 25\text{Hz}$ 时) 的变化限制在 0.5Hz 以内。

光学窗口组件和空间光学遥感器整机的前后特征试验的量级为 $0.2g$, 扫描频率范围是 $2\text{-}2000\text{Hz}$, 扫描速率为 4oct/m in 。