

空间相机空间环境专项试验设计

孙天宇

(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: 为了确保空间相机在整个生存周期可靠地工作, 根据空间环境的特点及空间相机的特性, 提出了仿真空空间相机空间环境的专项试验设计方案。方案包括光学性能验证试验, MTF 性能测试, 热真空环境下的温度调焦系数专项试验, 考察碳纤维复合材料稳定性的结构性能验证试验, 验证电子元器件是否满足相机功能和性能要求的电子学性能专项试验, 验证活动机构可靠性及寿命的专项试验。将这些专项试验应用于某空间相机, 试验结果表明, 各工况的全色 CCD 的 MTF 均达到了指标要求, 实现了检验空间相机光学特性、结构特性和电子学特性的目的。目前空间相机在轨执行任务运行良好, 完全适应空间环境要求。

关键词: 空间相机; 空间环境; 专项试验; 设计方案

中图分类号: V248.3 文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112812.0019

Special Experiment Design of the Space Environment for Space Camera

SUN Tian-yu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to ensure that the space camera works reliably in its entire period, the special experiment design of the space environment for space camera is presented according to the characteristics of the space environment and the space camera. The design scheme includes the optical property validation test, MTF test, the special experiment of the temperature focus coefficient in the thermal vacuum environment, structure performance test to examine the stability of carbon fiber composite, the special experiment of electronics performance to verify the electronic components whether satisfy the need for the function and capability of the space camera, the special experiment to validate the reliability and the life of moving parts. The experiment results of applying these special experiments to a

certain space camera show that MTF of panchromatic CCD in different condition achieves the index requirements, realizes the purposes of verifying optical properties, structure characteristics and electronics characteristics. At present, the space camera on-orbit mission is running well and able to adapt to the need of the space environment.

Keywords: space camera; space environment; special experiment; design scheme

1 引言

空间相机要经受发射阶段的振动、冲击等恶劣力学环境影响,在太空使用过程中受到热、真空环境及空间辐射的影响,而且空间相机通常是一次使用不可维修的产品,因此对可靠性有很高的要求。为了保证相机在星上环境使用中的质量、功能、性能,各种试验要贯穿在设计、生产、装配过程中。主要有例行环境试验、可靠性试验、专项试验三类,例行试验包括力学环境试验、热循环试验、热真空试验等,可靠性试验包括电子元器件筛选试验、整机老练试验和可靠性增长试验等;专项试验包括热平衡试验、热光学试验、综合动态成像试验等。空间相机是光、机、电的综合体,在方案、初样、正样设计过程中,除需要进行必要的例行环境试验外,还需进行一些专项试验来检验相机的各项性能指标。空间相机方案设计阶段大都建立在理想化设计参数基础上,实际工程中由于加工制造、材料特性以及载荷与边界条件存在一些不确定因素以及整机装调等的影响,实际的空间相机性能与设计的性能会存在一定差异,为了验证空间相机的实际性能是否能真正满足星上环境要求,在空间相机投入使用之前必须要进行试验与验证。而例行环境试验无法全面地验证空间相机的性能,因此,针对空间相机不同系统或者部组件进行相应的专项试验验证,发现其对环境是否存在不适应的环节,为下一步优化和改进设计或装调工艺提供依据。例如,热光学试验评价空间相机在星上环境中的温度适应能力,是在实验室模拟空间热环境条件下对调制传递函数 MTF 性

能的验证,确定其在热真空环境下的温度调焦系数。

为了检验其光学特性、结构特性、电子学特性等是否适应星上环境工作,尽早发现空间相机不适应星上环境的薄弱环节,进一步优化设计和装调工艺,给出了空间相机在研制过程中的专项试验设计方案及实施方法。

2 空间相机的组成及适应环境

空间相机一般由光学系统、机械结构、成像系统、主控系统和热控系统等组成。光学系统用于将来自物理目标的辐射汇聚到成像系统的 CCD 探测器上,作为光学系统重要指标的调制传递函数 (MTF) 以及各镜头的真空、温度变化情况,必须采用专项试验来验证其是否满足空间相机的性能要求。机械结构用于使各零、部件连接和固定,形成相机整体,并与卫星实现机械接口。现在的空间相机基本都有轻量化和调焦功能的要求,因此,结构材料大多选用轻质材料碳纤维,也有要实现调焦的活动部件,为了保证空间相机的质量及功能,对于碳纤维及活动部件都需进行专项试验来保证相机的质量及性能。成像系统主要功能包括将光信号转换为电信号、时钟产生、CCD 驱动、信号采集以及放大和增益匹配,并将模拟信号转换成数字信号。主控系统以相机主控 CPU 为核心,是对相机进行综合控制和管理的系统,完成接收外部指令、调焦控制、主动热控、对成像系统控制等功能。热控系统用于控制相机的温度环境,对于其是否满足相机的性能要求也进行专项试验验证。

空间相机根据其使用环境的特点,必须采取适

应空间环境特性的技术措施:

(1) 相机要在真空条件下正常工作, 需考虑大气与真空的折射率的差异, 以便计算和校正引起相机的离焦;

(2) 活动部件在真空环境下须进行防冷焊设计;

(3) 有机材料在轨道上工作, 特别是真空环境下产生挥发, 可能污染光学元件表面及探测器, 必须考虑污染问题;

(4) 地球辐射带的粒子辐射会使光学元件的透过率降低, 对光电元器件产生影响, 必须进行防辐射设计;

(5) 在轨道环境中, 舱内温度变化对空间相机的光学系统有影响, 从而影响图像的品质, 因而对空间相机必须进行热分析和热设计, 并采取热控措施。

空间相机在发射及在轨工作期间主要会受到力、热、真空以及空间辐射的影响, 为了保证空间相机在整个设计生命周期内能够满足其分辨率、调制传递函数 (MTF) 以及成像质量等要求, 在整个相机设计和研制过程, 除需完成相关的例行环境试验 (力学环境试验、热循环试验、热真空试验) 外, 还需设计一些专项试验来验证相机在在轨工作的空

间环境条件下, 其性能能否满足指标要求。

3 星上环境的专项试验设计

空间相机在星上环境的整个生存期间, 主要受到力学环境效应和真空热环境效应影响, 见表 1 和表 2^[1], 为了保证空间相机能够适应空间环境的影响以及其质量和性能, 在空间相机投入使用之前必须要进行试验的验证, 而例行环境试验不能全面地验证空间相机的性能, 因此, 针对空间相机不同系统或者部组件要进行相应的专项试验来验证, 发现其对环境是否存在不适应的环节, 为下一步优化和改进设计或者装调工艺提供依据。星上环境专项试验主要包括:

(1) 光学性能验证专项试验。检测空间相机的光学系统指标如调制传递函数 (MTF)。要在实验室模拟空间热环境条件下, 测试空间相机的 MTF 性能, 确定其在热真空环境下的温度调焦系数, 就必须通过设计专门的热光学试验解决。空间相机光学系统对消除杂散辐射能力的描述使用杂光系数^[2], 杂光的大小直接影响空间相机的信噪比, 影响对图像的解析效果, 因此应设计专门的杂光测试试验。为了验证空间相机热设计的正确性, 评价其在真空条件下的温度适应能力, 通常是通过模拟外热流的方式, 试验工况, 至少包括高、低温各一个工况,

表1 空间相机力学环境效应

有效载荷	力学环境效应	影响
相机本体	振动加速度响应放大倍率过大	光机结构精度变坏甚至结构破坏
	光学元件位置变化 (离轴、离焦、倾斜)	导致视轴 (LOS) 漂移、波前 (WFE) 畸变,
	光学元件面形畸变	使成像与光谱质量变坏
	光机结构装配间隙、胶层等非线性破坏	
	光机结构中螺钉松动	
电控箱	机上光电器件损坏 (如定标系统灯丝断掉等)	光电器件功能丧失
	扫摆、偏流及调焦等运动机构失灵、精度破坏	功能丧失、机构运动非线性
	电路板振动过大	电子元器件振坏, 电连接器接触不良
电控箱	电路板组件间相互撞击	
	内部电缆摩擦	内部电缆线路短路或断路
	机箱螺钉断裂	机箱变位、机箱壁振坏
电控箱	系统MTF下降, 光电器件或结构损坏, 可靠性下降	

表2 空间相机真空热环境效应

构件	热真空环境效应	影响
光学遥感器本体	光学元件位移, 元件间相对位置改变	光学系统LOS, WFE改变
	光学元件产生热弹畸变	MTF下降, 空间分辨率、光谱分辨率下降
	透镜(棱镜)折射率/像散改变	像质变坏
	结构中的复合材料、涂层或粘胶产生出气现象	结构尺寸稳定性破坏
	冷凝作用	光学表面、热控涂层污染, 图像清晰度下降
	热控调谐机构热弹性变形	调谐机构精度下降甚至失灵
探测器	扫摆机构等运动副冷焊	运动机构线性度破坏、运动功能失效
	使CCD器件热噪声、暗电流增加	S/N下降
电控箱	低压放电(电晕)	气压下降过程中出现电子元器件失效
	元器件材料受热退化、机械应力疲劳	可靠性下降

以考验测温组件的适应能力, 验证热设计的正确性, 因而须设计专门的热平衡试验^[3]来验证。

(2) 结构性能验证专项试验。近年来, 对空间相机的轻量化要求越来越高, 因此, 空间相机结构系统大多采用轻量化材料, 如碳纤维复合材料, 而该种材料在大气中存储和使用时有吸湿的特性, 这样, 在真空使用环境中会产生放气, 从而引起尺寸和质量的变化, 对结构支撑件会产生影响。为考察碳纤维复合材料的稳定性, 需要设计湿热专项试验对其进行验证。

(3) 电子学性能专项试验。空间相机的成像系统和主控系统采用了大量的电子元器件, 要保证相机在星上的整个生存周期内能完好地工作, 电子元器件就必须满足能长期在真空下正常工作; 同时, 在长期的空间离子辐射下也要正常工作。因此, 须设计辐照专项试验, 来验证这些电子元器件是否满足相机的质量、功能和性能要求。为了检验空间相机在正常工作状态下抗外界干扰的能力以及其发射、辐射或者传导干扰是否会引起星上其他设备的工作异常, 需设计电磁兼容性试验进行检测。

(4) 活动部件专项试验。空间相机的调焦运动机构是相机中重要的活动机构, 其性能的稳定性直接影响相机的工作性能和质量, 如调焦机构发生卡死现象, 其位置不在正常焦面位置, 将会导致空间相机的图像质量下降, 因此, 对于此类活动机构除

方案阶段对轴承及丝杠等要进行防冷焊设计外, 活动部件装配完成后, 还要进行专门的高低温试验和常温寿命试验, 验证活动机构是否能够可靠地工作。

4 空间相机研制过程中专项试验实施

空间相机是光、机、电的综合体, 为了验证相机适应星上环境的能力, 保证相机的质量、功能、性能, 光、机、电各部分要根据其特点设计不同的专项试验。以下以某空间相机为例, 从验证光学性能、结构特性、电子学性能、特殊件(活动部件)性能4个方面介绍必须进行的专项试验。

(1) 光学性能验证专项试验

为了检测星上环境中的光学系统调制传递函数MTF以及真空离焦量, 通过热光学试验来进行测试。试验设备主要包括空间环境模拟器(以下简称真空罐)、模拟轨道舱、红外加热笼、相机温度采集系统、光学综合检测系统(平行光管等用于热光学试验的光学检测设备), 试验装置安装状态及布局如图1所示。试验条件要求一般为真空罐内压力低于 6.5×10^{-3} Pa、真空罐内污染 $\leq 1.0 \times 10^{-6}$ g/cm²、相机温度控制在0~30℃, 整个装置要置于气浮平台上。

(2) 结构性能验证专项试验

空间相机应用特点都要求轻量化, 采用轻量化材料碳纤维进行设计。为了考察碳纤维复合材料结构件的结构和尺寸稳定性, 通过严酷的湿热试验和

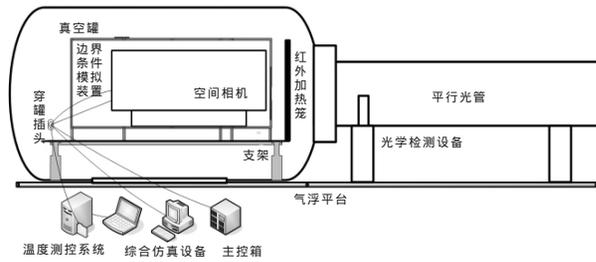


图1 热光学试验装置布局示意图

光学测试方法，可以定量地验证碳纤维材料对湿热环境的适应性。湿热试验在湿热试验箱中进行。将湿热试验分为两个阶段，即按地面机载电子设备的湿热条件和按航天设备的湿热条件分别进行，先按地面、机载电子设备的试验条件进行5个循环的湿热试验（1个循环24h），然后按航天设备的湿热条件进行10个循环的湿热试验（1个循环12h）。图2^[4]为空间相机碳纤维连接筒在湿热箱中准备试验的照片。



图2 碳纤维连接筒湿热试验

湿热试验后采用光学测量方法来测量连接筒两个端面的相对角度变化量，经过光学测试，湿热试验后连接筒两个端面的角度变化量为18°。

(3) 电子学性能专项试验

空间相机星上工作时会受到空间离子辐射的影响，可能改变电子元器件的性能，因此，在相机方案阶段对电子元器件要进行辐照试验。辐照试验使用的辐射源，一般有钴-60源模拟电离效应；质子回旋加速器模拟空间质子谱的辐射效应；电子枪与直线电子加速器则模拟空间电子与质子（采用等效方法后）谱的辐射效应等。由于直线电子加速器射

出的电子能量与通量可调，有利于等效方法的使用，技术相对简单，费用较低，因而大多采用该方式进行试验。辐照试验在真空环境中进行，压力一般不小于 10^{-4} Pa；但是，对氧化不敏感的元器件也可以在大气中进行^[5]。

(4) 活动部件专项试验

空间相机的调焦运动机构是相机中重要的活动机构，其性能的稳定性直接影响相机的工作性能和质量，如调焦机构发生卡死现象，其位置不在正常焦面位置，将会导致空间相机的图像质量下降。为验证活动机构在星上环境下能否正常工作，通过高低温试验对调焦部件力矩进行测试。采用加挂砝码、通过自由落体的方法进行测试，示意图如图3所示，温度范围一般在-15~35℃之间。

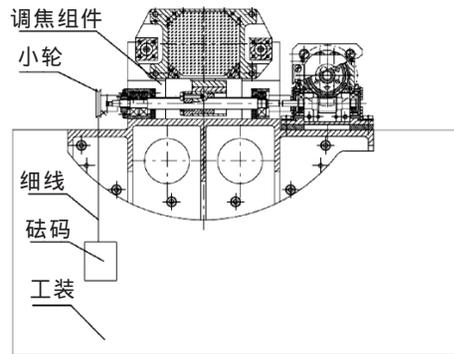


图3 调焦组件力矩测试示意图

所有试验完成后，测得力矩最大值见表3，表中低温（-15℃）下机构的最大阻力矩为168 g·cm，指标要求为180 g·cm，满足指标要求。

常温寿命试验是为了考核活动部件在常温常压

表3 不同温度条件下调焦组件的结构力矩

温度 (°C)	砝码质量 (g)	力矩 (g·cm, R=1.2 cm)
20.9	95	114
34	120	144
10	120	144
0	140	168
-10	140	168
-15	140	168

条件下,任务时间内的工作性能和可靠性。试验条件按大纲规定,初样活动部件的试验时间不少于3倍任务时间(80 h),即试验时间不少于240 h。考虑到正样活动部件不宜进行大量级寿命试验,计划试验时间为96 h,约为任务时间的1.2倍。其余试验内容按任务要求相关文件执行。

试验后检查活动部件的外观,没有发现任何损坏现象。在结构未解体的情况下仔细观察,没有发现活动部件丝杠工作表面有异常,即无划痕、压痕、磨损和剥伤现象。用手拨动检查,机构转动灵活,无卡滞现象,润滑状态良好。

由上述试验结果可以判断相机活动部件的可靠度满足设计要求。

5 专项试验结果分析

以某高分辨率可见光空间相机热光学专项试验为例对试验结果进行分析,该空间相机的MTF设计值为0.17,热光学试验结束后,经过对试验数据的处理和讨论,得出以下分析结果:

(1)根据热光学试验结果,在有主控热控的情况下,焦面位置变化与注入温度变化基本呈线性关系,变化率约为每摄氏度编码器值23码,注入温度升高,码值变大。焦面位置整体变化较小,而在同一注入温度下,焦面位置有一定程度的波动。确定最终空间温度自动调焦函数为:

$$y=23.135t+3\ 551 \quad (1)$$

式中 t 为相机主镜室平均温度(主镜设置4个测温传感器的平均值),单位:℃; y 为调焦编码器对应

的十进制码值自动温度调焦控制以,主镜室平均温度作为调焦控制自变量。

(2)注入温度与主镜室温度变化呈线性比例关系,比例约为1,说明主镜室温度受控,且温度控制程度较好。在0~20℃温度范围内,相机主镜、主镜室、次镜、次镜座的温度在现有热控策略下均受控,且受控程度很好。相机热控满足指标要求。

(3)各工况测试的全色CCD传递函数均在0.13~0.161范围内,传函稳定,但相对于实验室环境下的测试结果(0.17左右)低;分析原因为光管次镜支杆形成遮拦以及光管温度变化等多方面因素导致。

6 结 论

本文从保证空间相机的质量、功能、性能的角度出发,论述了空间相机在整个研制周期中除例行环境试验外,在研制过程中还必须进行的热光学试验、热平衡试验、电磁兼容试验、辐照试验、结构材料的湿热试验。活动部件专项试验等试验的目的、必要性及方法。本文的专项试验没有设计可靠性增长试验^[6],在后续的空间相机项目中可设计相应的可靠性增长,对相机的性能指标进行验证。以某空间相机为例论述了专项试验的具体实施方法,通过对热光学试验结果的分析说明运用专项试验的方式能够验证空间相机的性能指标,这些性能指标在发射场及在轨测试中得到了验证。目前,该空间相机在轨运行稳定,完全适应星上环境要求,证明了这些专项试验的有效性。

参考文献

- [1] 卢颢,颜昌翔,吴清文,等.空间光学传感器环境适应性设计与试验研究[J].中国光学与应用光学,2009,2(5):364-376.
- [2] GJB 2501-95 星载摄像机试验方法[S].国防科工委军标出版发行部,1995.
- [3] QJ 2630.2-94 卫星组件空间环境试验方法 热平衡试验[S].中国航天工业总公司,1994.
- [4] 李威,郭权锋.碳纤维复合材料在航天领域的应用[J].中国光学,2011,4(3):201-212.

[5] 陈世平. 空间相机设计与试验[M]. 北京: 宇航出版社, 2003.

[6] 曾天翔. 可靠性及维修工程手册 下册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

作者简介: 孙天宇 (1975-), 男, 蒙古族, 内蒙古通辽人, 学士, 工程师, 主要从事空间相机的仿真试验与地面测试技术研究。E-mail: suntianyu@163.com

《光学 精密工程》 (月刊)

《光学 精密工程》是中国仪器仪表学会一级学术期刊, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办, 科学出版社出版。由国内外著名科学家任顾问, 陈星旦院士任编委会主任, 国家科技部副部长曹健林博士担任主编。

《光学 精密工程》坚持学术品位, 集中报道国内外现代应用光学、光学工程技术、光电工程和精密机械、光学材料、微纳科学与技术、医用光学、先进加工制造技术、信息与控制、计算机应用以及有关交叉学科等方面的最新理论研究、科研成果和创新技术。本刊自2007年起只刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省、部委基金项目资助的论文。《光学 精密工程》竭诚欢迎广大作者踊跃投稿。

本刊获奖:

中国精品科技期刊
中国科学技术协会择优支持期刊
中国百种杰出学术期刊
第一届北方优秀期刊
吉林省双十佳期刊

国际检索源:

《美国工程索引》(EI Compendex)
《美国化学文摘》(CA)
《英国INSPEC》(SA)
《俄罗斯文摘杂志》(PЖ)
《美国剑桥科学文摘》(CSA)

国内检索源:

中国科技论文统计源期刊
中国学术期刊(光盘版)
万方数据系统数字化期刊
台湾华艺中文电子期刊网
中国科学引文数据库
中国物理文献数据库
中国期刊网

中文核心期刊要目总览(北大)
中国学术期刊综合评价数据库
中国光学与应用光学文摘
中国科学期刊全文数据库
中国光学文献数据库
中国学术期刊文摘
中国物理文摘

电 话: (0431) 86176855

传 真: (0431) 84613409

E-mail: gxjmgc@ciomp.ac.cn gxjmgc@sina.com

http://www.eope.net