

星载 TDICCD 随机振动与数据处理研究^{*}

陈丁跃^{1,2} 周仁魁² 李英才²

¹(长安大学 西安 710064)

²(中国科学院西安光学精密机械研究所)

摘 要 对星载 TDICCD 进行了随机振动试验, 提出了 TDICCD 机体在进行宽带随机振动工程试验中必定面临的几个技术问题及处理方法, 分析了振动环境与结构振动特性的关系及其对 TDICCD 结构的影响和危害, 研究了试验的实用技术和控制方式的选择要点. 根据对星载 TDICCD 振动信号的现场采集结果, 分析了振动信号的时域划分、信号采集基本参数的选择原则, 并用信号分析仪进行了数据处理, 获得了该机体振动的参数, 这些动态特性参数为星载 TDICCD 的防振、隔振提供了可靠的参考, 为对机体进行有限元模态计算提供了修正和科学依据.

关键词 星载 TDICCD; 随机振动; 振动试验; 信号分析仪

中图分类号 V 416

Research on Random Vibration for Satellite TDICCD Camera and Data Processing

CHEN Dingyue^{1,2} ZHOU Renkui² LI Yingcai²

¹(Changan University, Xian 710064)

²(Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences)

Abstract Random vibration test of the satellite TDICCD camera is performed in this paper. Several engineering problems during TDICCD camera random vibration test were discussed and solving methods were pointed out. The relationship between the vibration environment and structural dynamic properties is analysed, as well as the vibration environment could pose the effect and hazard to TDICCD structure. In addition the testing's practical technique and the selective gist of the control methods are studied and introduced separately. Based on site-collected results of the satellite TDICCD camera vibrating signal, the paper analyzes the time-region division of vibrating signal and the selection principle of its parameters. The date analysis is carried out with signal processor and the camera's each state of parameters were obtained. Parameters of the block's dynamic characteristic can provide us a reliable reference to satellite TDICCD camera's antivibration and vibration isolation. These also are used as modification and scientific basis for finite element calculation of camera's modality.

Key words Satellite TDICCD, Random vibration, Vibration tests, Signal processor

^{*} 中国博士后科研经费、中国博士后科学基金项目 (2004036140) 和中国科学院王宽诚博士后工作奖励基金项目 (413) 共同资助
2004-06-10 收到原稿, 2004-10-20 收到修定稿

1 引言

振动环境是星载 TDICCD 相机在研制、运输及空间工作期间所必须承受的诸多外部环境之一, 为验证星载相机在寿命期内能否承受振动环境并在此环境下正常完成它的功能, 作为一项技术措施和技术保证, 在星载相机研制过程及上天前都需要进行振动试验. TDICCD 光机结构的减振、抗振设计固然是星载仪器能否经受振动试验考核的主要关键所在, 分析表明, 52.7% 的失效与环境有关, 而星载相机因振动、冲击环境所引起的失效占 28.7%, 卫星飞行中有 50% 的故障是由振动问题引起的^{[1]~[5],*}. 这表明在样机的研制中, 星载仪器的振动试验是十分必要的. 而振动试验中随机振动控制技术的出现, 使得在试验室内近似复现或模拟已知的随机振动环境成为可能, 同时为星载仪器的设计改进, 或者判断它们是否满足规定的技术指标提供了科学依据.

2 星载 TDICCD 光机结构系统

某星载 TDICCD 样机光机结构系统由外遮光罩、承力镜筒、主反射镜镜组、次反射镜镜组、折轴镜组、第 3 反射镜镜组、TDICCD 焦平面组、电子信号处理系统和大箱体等单元组成. 星载 TDICCD 相机摄像时, 相机随卫星沿轨道方向运动, 对地面同一个静止目标多次曝光成像. TDICCD 相机成像原理如图 1 所示, 即地面目标像 → 主反射镜 → 次反射镜 → 折转反射镜 → 第 3 反射镜 → TDICCD 焦平面组件 → 图像信号输出. 为了保证诸反射镜的面形和位置精度, 诸镜座均采用热膨胀系数与反射镜相近的殷钢制造, 镜座与反射镜之间采用 XM23 硅橡胶粘结, 次反射镜组和主反射镜组分别与高模量碳纤维镜筒的前、后法兰盘连接; 折转反射镜组钛合金支架与主反射镜组连接; 第 3 反射镜组安装在大箱体内; TDICCD 焦平面组件安装在大箱体外面; 大箱体安装在高模量碳纤维镜筒的中法兰盘上. 在大箱体大的腰部两侧各有一个带孔的凸耳, 为样机与卫星平台的支架安装定位基准.

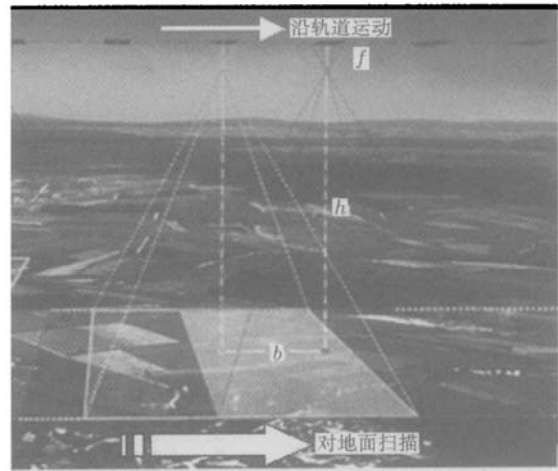


图 1 星载 TDICCD 对地目标扫描
Fig.1 The satellite TDICCD camera observe on earth target

3 随机振动试验类型及响应

随机振动试验按实际环境要求有以下类型: (1) 宽带随机振动试验, 这是应用最广的随机振动试验; (2) 窄带随机振动试验, 这种随机振动有一个中心频率, 有一定带宽, 但带宽内功率谱密度值是不变的, 即窄带随机扫描试验; (3) 宽带随机加上一个或几个正弦信号的振动试验; (4) 宽带随机加上一个或几个窄带随机信号的振动试验. 随着科学技术的发展, 随机振动试验的类型可能还会增加, 只要有客观需要, 一般总可以在实验室内实现.

随机振动是不能用数学公式精确描述而只能用统计方法求其宏观特性的振动过程. 平稳随机振动就是在所考虑的时间间隔中其统计特性不随时间而变化的随机过程. 可以证明, 系统对平稳随机振动的响应也是平稳随机振动过程, 即一个线性系统在任意频率上的响应功率谱密度等于激励振动的功率谱密度乘以该频率上的复数频响函数的平方, 即为

$$W_2(\omega) = |H(\omega)|^2 W_1(\omega), \quad (1)$$

与相位特性无关. 式中 $H(\omega)$ 为系统的复频函数, $W_1(\omega)$ 和 $W_2(\omega)$ 分别为激励振动和线性系统对振动响应的功率谱密度. 功率谱密度就是每单位频带内谐波分量的均方值, 相当于能量. 其值为

$$W(\omega) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta\omega T} \int_0^T f_{\Delta\omega}(t) dt. \quad (2)$$

* 陈丁跃. 非线性振动的逆系统控制及相关研究. 2004 中国科学院博士后前沿与交叉学科学术论坛论文集, 2004

式中, $f_{\Delta\omega}(t)$ 是整个振动信号 $f(t)$ 在频带 $\Delta\omega$ 宽度内的频率分量, 当 $\Delta\omega$ 小到一定程度时, 可以认为 $W(\omega)$ 在此频率范围是个常量; $T = 2\pi/\omega$.

在实际研制、运输及空间工作期间, 星载 TDICCD 相机同时承受几个方向的受迫振动, 即沿 3 轴向 (x, y, z) 的往复振动和绕 3 轴的往复转动. 样机所承受的积累效应是这些方向个别效应的矢量和, 其响应可用试验分析方法得出.

4 星载 TDICCD 随机振动试验及数据处理

4.1 CAT 系统

振动 CAT(计算机辅助测试) 系统具有测试、数据处理和后置处理等功能. CAT 系统的工作原理为: 振动发生器振动, 激励起机械系统振动. 力传感器和运动传感器拾取振源和响应信号, 经前置放大器放大和低通滤波器滤后进行模数 (A/D) 转换, 把连续时间信号转换成离散的数字时间序列, 送入主机显示、加工、存储或输出. 模数转换器 (ADC) 是在 CAT 系统中把传感器测得的模拟信号转换成数字量才能送入计算机进行处理. 模拟量转换成数字量的过程, 称为模数转换, 用 A/D 表示; 数字量转换成模拟量的过程称为数模转换, 用 D/A 表示. CAT 由软件包完成数据处理, 所以软件包是 CAT 系统的核心, CAT 软件包的基本功能模块包括信号的采集、处理和输出等. 信号的数据处理常用的域有时域、时延域、幅域、频域和倒频域等.

4.2 专用振动信号处理系统

美国生产的 SpectraBook, Photon, RTPro 3.0, HP35670 机械系统分析仪是专用的振动信号处理系统. 对所测的对象更为专一, 对分析传动装置的振动信号更为有效. 它能有效地辨别个别的故障发生, 能综合处理故障信号. 它把振动信号由磁带机或计算机记录下来, 然后把信号输入给机械系统分析仪 (MSDA), 对试验中所得到的振动信号进行数字化处理. 即统计分析、基频带功率频谱分析、星载 TDICCD 样机分析和信号平均分析. 最后再把信号输入到计算机中去做后置处理. MSDA 是理想振动信号处理系统, 尤其对星载 TDICCD 样机振动信号更有效, 用这些专用设备能准确地找出各点响应.

图 2 显示星载 TDICCD 样机随机振动试验记录和监测, 被测对象为星载 TDICCD 样机, 振动信号由加速度传感器拾取, 通过 MSDA 送至显示器. 图 3 显示星载 TDICCD 样机的振动信号经 MSDA 进行数字化处理. 在统计分析模数得到的参数中, 振动数据的偏度、陡度、峰值系数及峰间值使用测定星载 TDICCD 样机振动最好的指示数据. 在振动监测中, 使用基频带功率谱分析, 这是应用最广泛的信号处理技术. 从星载 TDICCD 样机发生的振动通常伴随着主反射镜镜组、次反射镜镜组、折轴镜镜组、第 3 反射镜镜组等的固有频率以及耦合频率产生的振动. 一般来说, 像失衡、光机结构疲劳、结构及零部件的机械磨损这些特定振动在频谱中会产生明显的变化. 例如从振动信号所得到的平方根值可用以表明振动的严重程度. Lins 频率表示频谱

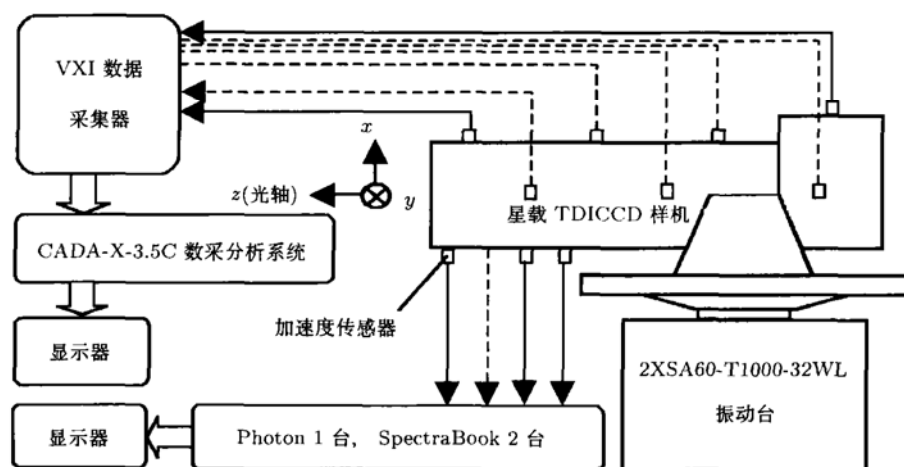


图 2 星载 TDICCD 随机振动试验和监测

Fig.2 The satellite TDICCD camera random vibration test and measure

的“重心”位置,它可以反映由振动而导致的频谱形状的主要变化.倒频谱来测定在复杂频谱中不易发现的周期分量.信号平均分析求同步时间平均值,着重于特定部位以获得较佳信号特征.对数字化时间信号求出其平均值,它不仅能消除本底噪声,而且可消除非周期信号.此技术的优点在于从此时间信号中可辨别星载 TDICCD 样机产生的局部振动.



图3 数据获得示意图

Fig.3 The sketch map of data be gained

4.3 其他振动信号分析处理系统

振动信号分析处理系统在国内、国外发展很快,以适应仪器设备状态监测与振动诊断的需要,中国靖江生产的 DHDAS 数据采集分析系统和 DH-5937 应变测试系统,主要功能是对中型机械设备进行监测与振动诊断,支持多种采集器,也可将 FFT 分析作为系统的前置端装置,系统具有丰富的数据采集、分析等功能.比利时生产的 CADA-X-3.5C 计算机数采分析软件主要功能有 FFT 谱分析显示、时域分析、极向量图等.国产的 CDMS 信号处理与振动分析系统,主要功能包括多通道模/数转换、数据采集显示、窗处理、时域分析、频域分析、细化、时序分析、倒频谱、解调、互谱、传递函数、相干脉冲响应、特征分析等.

5 依据 GJB 1027-90 随机振动试验及数据处理

GJB 1027-90 为星载 TDICCD 样机提供具有再现性的通用环境试验方法,是参照 MIL-STD-810C“空间及陆用设备环境试验方法”编制的.其振动、加速度、噪声和冲击试验的方法基本上等效采用了 810D 中的相应内容.该标准优先推荐宽带随机振动试验,主要是因为随机振动在很宽的频带范围内同时存在振动谱分量,各个频率处共振模态的相互作用能够得到充分体现,能更真实模拟现实的环境条件.

5.1 振动试验量值的确定

星载 TDICCD 在使用寿命期内,必须进行振动试验,以真实模拟星上的振动环境,为使仪器设备达到可靠性的要求(如结构完整性及耐久性、电子元器件的工艺设计装配、工作稳定性及仪器设备承受较恶劣的振动环境持续时间等)奠定基础.另外根据 GJB 1027-90 的规定,仪器设备必须经历振动功能试验和耐久试验.功能试验的目的是考核仪器设备在使用环境中能否满足技术条件所规定的性能指标要求,也就是检验仪器设备是否会产生工作失灵的问题.进行功能试验时,仪器设备必须处于工作状态,通常取使用过程中仪器设备所承受的最大振动量值作为功能试验量值;耐久试验考验仪器设备能否长时间承受预期的振动应力,其目的是检验仪器设备在使用环境下是否产生构件疲劳破坏和机械磨损等,在耐久试验过程中,不要求仪器设备满足专用技术条件所规定的全部功能要求,但耐久试验后,仪器设备不允许有破坏,而且要能达到其全部功能.因此,耐久试验只能给出较为合适的仪器设备维修周期,而不能给出仪器设备的疲劳寿命,设备的疲劳寿命需经过疲劳试验后才能给出.

对于星载 TDICCD,所需考虑的振动谱是由卫星发动机脉动推力、喷气噪声以及紊流边界层噪声引起最严酷振动情况的耦合.为了将现场环境等效压缩成一个较短时间内的试验,就要考虑振动量值和振动时间之间的关系.加速度试验量值的确定,在星载 TDICCD 设计过程中,往往在星载 TDICCD 运动载荷分析计算或实测数据之前,就必须开始与部件提供厂签订技术协议,采用 GJB 1027-90 所列数值和考虑星载 TDICCD 轨迹运行引起附加载荷的同时,必须充分考虑星载 TDICCD 过载荷的大小,并且取其最大值作为试验量值.

5.2 试验技术

由 GJB 1027-90 和试验大纲,试验首先确定星载 TDICCD 样机随机振动频率的大致范围如表 1,然后用 2XSA60-T1000-32WL 电动式振动台在所确定的 20—2000 Hz 的频率范围内依次按图 4 所示曲线对星载 TDICCD 样机的 x, y, z 轴向随机加激振力,图 4 激振关系显示了随机试验条件下的功率谱密度曲线图,总均方值等于功率谱密度曲线下所包含的面积,只要将曲线下总面积和计算出来再开方就得出总均方根加速度.图 2 是星载 TDICCD 随机振动试验框图,其中做 x 方向振动试验时,要将

样机固定在图 2 所示振动台上方位置。试验的核心部分是测量星载相机上若干测点的加速度响应。

表 1 星载 TDICCD 随机振动试验规范
(3 向测量数据)

**Table 1 The satellite TDICCD camera
random vibration test criterion
(3 direction measure data)**

频率/Hz	20—100	100—600	600—2000
功率谱密度	+3 dB/oct	0.002 g ² /Hz	-9 dB/oct
均方根加速度	1.28 g (rms)		
振动方向	沿 x, y, z 方向		
时间	每个方向 1 min		

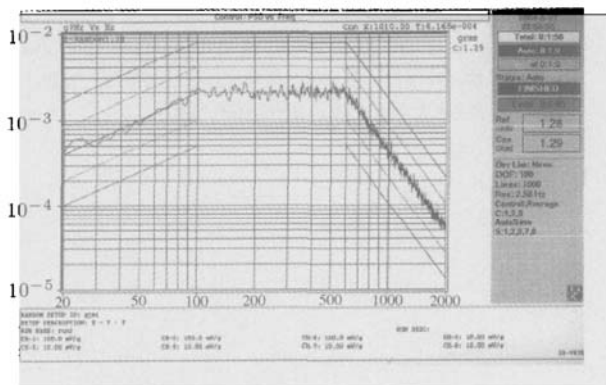


图 4 功率谱密度曲线图

Fig.4 Power spectrum density curve

宽带随机振动试验功率谱密度值与正弦扫描试验量值可以相互转换：在星载 TDICCD 仪器环境试验条件的技术协议中，有时需要更改振动试验类型。例如将宽带随机振动改为正弦扫描振动，这就带来了正弦与宽带随机振动试验量值的转换问题。严格地讲，正弦与宽带随机振动之间的普遍等效关系式是不存在的，但适合工程应用需要的近似等效关系式还是有的，其经验公式为 $A = 7\sqrt{10W_2(\omega)}$ 。式中， A 为正弦试验值，单位为 g ； $W_2(\omega)$ 为宽带随机振动功率谱密度值，单位为 g^2/Hz 。

5.3 试验分析

星载 TDICCD 按照所要求的各种轨迹运行, 以验证 TDICCD 的可靠性, 同时考核星载 TDICCD 在实际环境中的承受能力, 确保星载 TDICCD 的定型和鉴定。根据星载 TDICCD 在轨迹运行中暴露出的故障, 按性质进行分类, 找出由于星载 TDICCD 上环境影响而产生的故障, 以便更改星载 TDICCD

的设计方案。有些星载 TDICCD 在地面试验和联试中运行状况良好,但在星载 TDICCD 上却出现问题,遇到这类情况首先应考虑环境影响的问题。星载 TDICCD 的质量和可靠性与环境密切相关,它们决定着星载 TDICCD 的固有特性,而环境试验是发现和评价星载 TDICCD 耐环境能力的手段,它贯穿于星载 TDICCD 研制的全过程。因此,必须正确理解和合理确定环境试验量值,以保证星载 TDICCD 的质量。

在表 1 频带内, 以不同频率间隔扫频后, 当激振频率接近系统的固有频率 (ω_n) 时, 振动相应就显著增加, 其试验结果响应曲线示于图 5, 幅值最大的频率为共振频率 $\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2}$, 在小阻尼时可以直接根据共振对应的频率来估计固有频率。在响应曲线中, 如果在其共振峰的 $1/\sqrt{2}$ 处作一水平线, 交图 5 响应曲线于某 1, 2 两点, 它们对应的频率为 ω_1, ω_2 , 那么阻尼比的估计值为 $\xi = (\omega_2 - \omega_1)/2\omega_n$ 。从图 5 星载 TDICCD 样机 x 向随机振动试验自功率谱来看, 幅频特性随频率的增大, 振动幅值迅速增加, 在频率为 210 Hz 时达到最大值, 并随频率增大迅速减小。对应的相频特性在没有达到固有频率时变化缓慢, 在固有频率附近迅速变化, 之后又变缓慢。表明星载 TDICCD 响应对输入激励呈现较大的衰减特性, 系统具有足够的阻尼和良好的稳定性, 显示星载 TDICCD 总体光机结构具有较好的刚度裕量, 结构抗应变能力较强, 未出现光机结构及零部件变形和颤振问题, 星载 TDICCD 的一阶固有频率高于总体提出的技术指标, 符合设计要求, 不会造成星载 TDICCD 损坏。

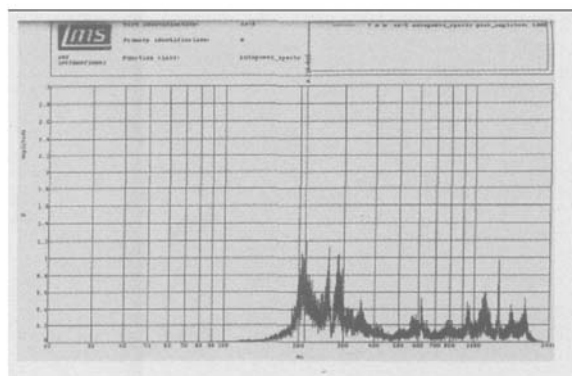


图 5 x 向随机振动试验 ($0.035 \text{ g}^2/\text{Hz}$)

Fig.5 x direction random vibration test ($0.035 \text{ g}^2/\text{Hz}$)

6 结束语

振动试验是星载 TDICCD 环境试验中不可或缺的一项。随着计算机技术、数字信号处理技术以及结构动力学分析技术的不断发展与创新, 振动已由正弦振动逐渐过渡到了随机振动, 以后的振动环境更将是多种多样、变幻莫测的; 但是, 无论怎样变更, 对于星载 TDICCD 相机来说, 其振动试验中的振动条件必然取之于实际, 振动目的必然是能够应用于实际。而如何行之有效地通过振动试验来发现问题, 紧密地联系实际是其必然的发展趋势。因此, 从试验参数识别、试验控制、振动分析几个方面入手, 采集实际动态性能参数并将之应用于振动试验中是空间振动领域的一个发展方向, 必将引起重视。

参考文献

- [1] Hu Zhiqiang. APP Technique for Random Vibration Test. Beijing: China Measurement Press, 1996. 37—55. in Chinese (胡志强. 随机振动试验应用技术. 北京: 中国计量出版社, 1996. 37—55)
- [2] Smallwood D O. Random vibration testing of a single test item with a multiple input control system. In: Proc. IES., 1982, 42—49
- [3] Chen Dingyue. Dynamic analysis of delayed damper system in engineering structures. *J. Sound Vib.*, 2002, **250**(4):609—616
- [4] Zhang Xianda, Bao Zheng. Non-steady signal analysis and disposal. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 101—115. in Chinese (张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理. 北京: 国防工业出版社, 1998. 101—115)
- [5] Shen Fenglin, Ye Zhongfu, Qian Yumei. Signal statistic analysis and disposal. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2002. 69—110. in Chinese (沈凤麟, 叶中付, 钱玉美. 信号统计分析与处理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2002. 69—110)