

空间相机主镜组件随机振动试验仿真

杨近松

(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: 主镜组件作为空间相机的关键部件, 对其进行充分的随机振动试验是必不可少的, 而试验环境仿真预示可以为试验条件的合理制定提供参考依据。本文对空间相机主镜组件结构建立仿真模型, 通过随机振动试验仿真计算, 预示了主镜组件在随机振动环境下的加速度及应力响应, 验证了结构设计方案的可靠性, 为相机结构设计初始阶段的力学环境条件提供合理的参考依据。

关键词: 主镜组件; 随机振动试验; 仿真预示

中图分类号: TP391

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112810.0053

Simulation for Random Vibration Test of Primary Mirror Component of Space Camera

YANG Jin-song

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

Abstract: As an important component of space camera, the primary mirror component must be tested sufficiently by a series of random vibration, while the simulation indication of test environment can provide reference for establishing the test condition. A simulation model was built for primary mirror component of space camera in this paper, and was solved by means of simulation analysis of random vibration. The analysis result indicated the acceleration and stress response of primary mirror component under the action of random vibration load, verified the reliability of structure design, and provided reasonable reference for dynamic environment condition in beginning stage of camera structure design.

Keywords: primary mirror component; random vibration test; simulation indication

1 引言

随机振动试验是空间相机动力学环境试验的重要组成部分^[1-2],而主镜组件作为空间相机的关键部件,对其进行充分的随机振动试验是不可缺少的。在试验开始阶段,试验条件的制定是以仿真预示结果为依据的,因此,试验环境仿真预示是动力学环境试验的必经程序。

本文对空间相机主镜组件结构建立有限元模型,通过仿真分析预示主镜组件在随机振动环境试验下的响应情况,以验证主镜组件结构设计方案的正确性,考核主镜组件结构是否能承受可能遇到的随机振动环境,为试验准备阶段提供合理的试验条件。

2 随机振动基本理论

根据随机振动理论^[3],线性系统的自相关函数为:

$$R_j(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_j(t) u_j(t-\tau) d\tau \quad (1)$$

这里 $R_j(0)$ 是 $u_j(t)$ 的均方值,线性系统的自谱函数为:

$$S_j(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \left| \int_0^T u_j(t) e^{-j\omega t} dt \right|^2 \quad (2)$$

自相关函数和自谱函数可以用傅立叶变换相互转换,即:

$$R_j(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty S_j(\omega) \cos \omega \tau d\omega \quad (3)$$

在随机载荷的激励下,线性系统的响应为:

$$u_j(\omega) = H_{ja}(\omega) F_a(\omega) \quad (4)$$

这里, $H_{ja}(\omega)$ 是频响函数, $F_a(\omega)$ 是输入函数,如果有多个激励同时输入时,线性系统的响应为:

$$u_j(\omega) = H_{ja}(\omega) F_a(\omega) + H_{jb}(\omega) F_b(\omega) + \dots \quad (5)$$

用矩阵形式表示:

$$u_j(\omega) = [H_{ja}(\omega) H_{jb}(\omega) \dots] \begin{Bmatrix} F_a(\omega) \\ F_b(\omega) \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (6)$$

线性系统输出的响应谱为:

$$S_{u_j u_j}(\omega) = T [H_{ja} H_{jb} \dots] \begin{Bmatrix} F_a(\omega) \\ F_b(\omega) \\ \vdots \end{Bmatrix} [F_a^*(\omega) F_b^*(\omega) \dots] \begin{Bmatrix} H_{ja}^* \\ H_{jb}^* \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (7)$$

又可以写成:

$$S_{u_j u_j}(\omega) = [H_j]^T [S]_{IN} [H_j^*] \quad (8)$$

这里 $[H_j]^T = [H_{ja} H_{jb} \dots]$, $[H_j^*] = \begin{Bmatrix} H_{ja}^* \\ H_{jb}^* \\ \vdots \end{Bmatrix}$, $[S]_{IN}$ 为输入的谱矩阵:

$$[S]_{IN} = \begin{bmatrix} S_{aa}(\omega) & S_{ab}(\omega) & \dots \\ S_{ba}(\omega) & S_{bb}(\omega) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (9)$$

3 主镜组件仿真模型

3.1 仿真模型建立

主镜组件是空间相机的关键部件,仿真模型的建立应最大程度地忠实于原结构。主镜组件主要由主镜、柔性连接件、中心轴、背板构成,各构件模型直接由三维实体生成以精确描述几何体,将各构件模型组装在一起形成组件仿真模型,构件之间的连接按实际装配情况采用节点直接对接,处理完的模型单元总数为 129 492,节点总数为 36 673,光轴方向为 Z 向,仿真模型示意图如图 1 所示。

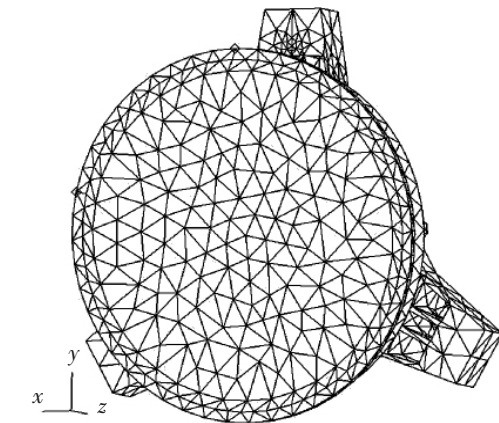


图1 主镜组件仿真模型示意图

3.2 仿真模型材料属性

主镜组件仿真模型所用材料属性由表 1 中的数据提供。

表1 主镜组件材料属性

名称	密度 ρ (10^{-6} kg/mm ³)	弹性模量 E (kg/mm ²)	泊松比 μ	应用
微晶玻璃	2.53	9 060	0.24	主镜
钛合金	4.40	11 400	0.29	背板、中心轴
铟钢	8.10	14 100	0.25	柔性连接

3.3 载荷与边界条件

3.3.1 边界条件

在主镜组件随机振动环境试验中,用螺钉将组件中的背板与振动台连接,以固定组件结构。激励载荷为一个由振动台输入的加速度载荷,是一个典型的基础加速度强迫振动,对这种基础加速度强迫振动响应分析可以采用大质量法^[4-5],图2中序号为30 000的节点是大质量点,通过RBE2单元与背板安装螺孔处节点相连,并约束掉与载荷同方向以外的所有自由度。

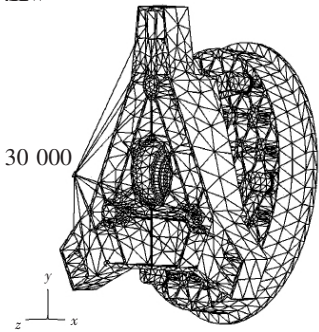


图2 主镜组件仿真模型边界条件示意图

3.3.2 工况载荷

沿 x 、 y 、 z 3个坐标轴方向分别施加一个基础运动,该运动由加速度功率谱密度来描述。参照现有随机振动试验条件,确定表2中的随机振动功率谱密度(PSD)。

表2 随机振动加速度功率谱密度

振动方向	频率 (Hz)	PSD	总均方根加速度
X 、 Y 、 Z	20~100	3 db/oct	$6.25g_{rms}$
	100~600	$0.052 g^2/Hz$	
	600~2000	-9 db/oct	

4 结果分析

根据随机振动环境试验大纲检测点位置,选取模型中主镜边缘一点作为仿真分析的响应输出点。对于随机振动响应分析结果,一方面是通过考察应力分布来判断结构的抗载能力,另一方面是通过考察加速度均方根值来衡量结构的动态特性。

具体分析结果见表3及图3~8。

表3 随机振动响应分析结果

振动方向	加速度响应		应力响应分析		
	加速度均方根值 g_{rms} (g)	放大倍数	最大响应 σ_{ms} (kg/mm ²)	发生部位	安全系数
X	10.2	1.6	2.37	中心轴	38
Y	11.1	1.8	3.53	柔性连接件	14
Z	14.2	2.3	2.77	柔性连接件	18

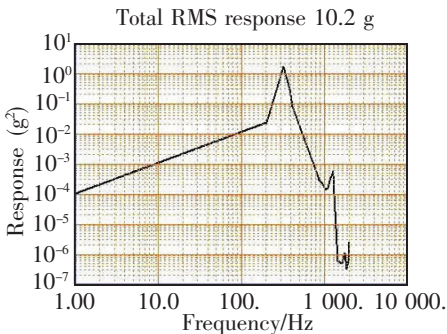


图3 主镜组件 x 向随机振动加速度响应曲线

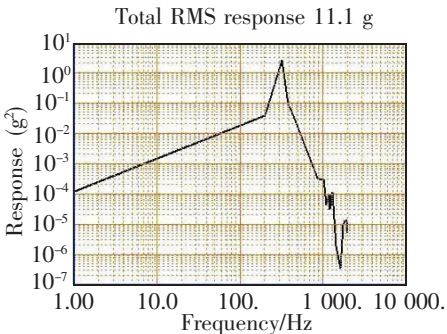
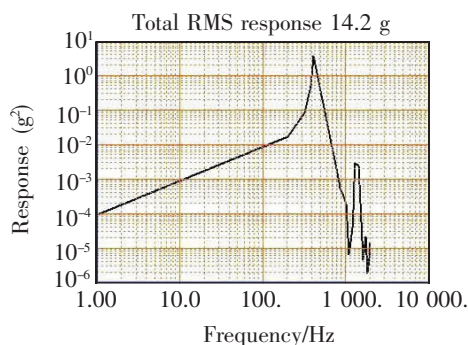
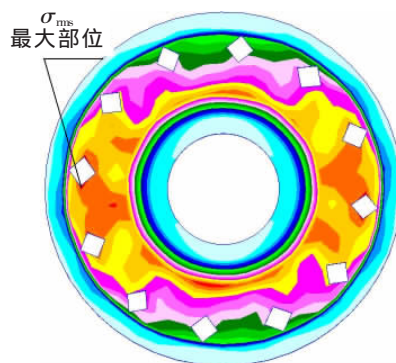
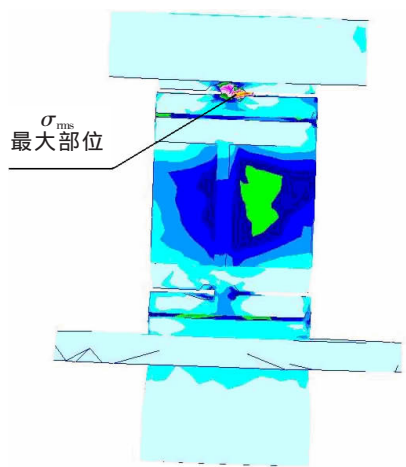
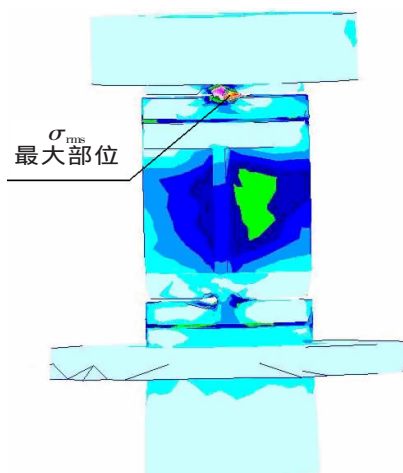


图4 主镜组件 y 向随机振动加速度响应曲线

图5 主镜组件 x 向随机振动加速度响应曲线图6 主镜组件 x 向最大应力响应云图图7 主镜组件 y 向最大应力响应云图图8 主镜组件 z 向最大应力响应云图

仿真分析结果表明,在随机振动环境试验条件下,主镜组件加速度及应力响应在安全裕度内,结构设计方案的可靠性满足使用要求。

5 结 论

通过对空间相机主镜组件随机振动试验环境的仿真计算,预示了空间相机主镜组件在随机振动环

境下的加速度及应力响应,验证了结构设计方案的可靠性,为相机结构设计初始阶段的力学环境条件提供合理的参考依据,缩短了产品设计周期,降低了研制成本。试验环境仿真由于在边界模拟、连接特性、阻尼系数等方面存在不确定性,会使预示结果有一定误差,但还是能够满足相机结构初步设计的要求。

参考文献

- [1] 张阿舟,张克荣,姚起杭,等. 振动环境工程[M]. 北京: 航空工业出版社, 1986.
- [2] 朱元夫. 系统级产品振动试验仿真[J]. 强度与环境, 2003, 11(4): 59-62.
- [3] 张景绘,王超. 工程随机振动理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [4] 周临震,王新民. 夹具强迫振动随机振动响应分析[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2003, 16(1): 43-45.
- [5] 范宣化,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, 28(2): 41-43.

作者简介: 杨近松 (1969-), 男, 汉族, 吉林长春人, 硕士, 副研究员, 1995年于中科院长春光机所获得硕士学位, 主要从事CAD/CAE技术的研究。E-mail: yangjs@ciomp.ac.cn