

# 高分辨率空间相机的工程分析\*

陈荣利<sup>1</sup> 赵信民<sup>2</sup> 解永杰<sup>1</sup> 马 臻<sup>1</sup> 樊学武<sup>1</sup> 李英才<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 陕西盛英科技公司, 西安 710049)

**摘 要** 以大型结构设计软件 SolidEdge 建立了高分辨率空间相机的精确的几何模型,在此基础上用大型有限元分析软件 MSC. Patran 建立了相机的有限元模型,并利用 MSC/Nastran 对该相机整机进行了工程分析. 其计算结果与试验结果相差 10% 以内.

**关键词** 高分辨率空间相机; 有限元法; 工程分析

**中图分类号** TH761.6 **文献标识码** A

## 0 引言

随着用户对空间相机的成像分辨率要求越来越高,光学系统的焦距越来越长,口径越来越大,这就对光机结构的设计、加工、装配、安装固定等提出了更高的要求<sup>[1]</sup>. 高分辨率空间相机采用三反射镜消像散(TMA)结构,光机结构由 80 多个零部件装配而成. 该系统是卫星的一个子系统,在卫星的发射、工作过程中,将产生一系列的振动和冲击. 这些振动和冲击必然会对相机产生影响. 同样,相机的力学特性也可能影响到卫星及其上的其他设备的正常工作. 了解相机的力学性能对掌握相机本身以及卫星的整个系统都是十分必要的. 另一方面,该相机技术难度大,造价高,风险大,研制周期长. 为了降低成本,减少风险,必须在相机研制以前就做好技术评估.

采用有限元法对高分辨率空间相机进行结构的静力学和动力学分析,以获得照相机在特定的环境下力学性能参数,帮助设计人员对设计做出正确的评价. 在计算中,我们以美国 MSC 公司的 MSC. PATRAN 和 MSC. NASTRAN 为主,并用 VisulNsatran 软件和 Sarp95 软件进行对比验证.

## 1 相机的有限元模型

在设计初,用 CAD 软件 SolidEdge 对相机结构进行精确的造型,并以此为基础完成了各组件及整机的装配,计算出了相机的重量、质心位置以及转动惯量. 根据相机各零件、组件实际测量质量及精确模装模型验证的计算结果换算出简化 CAD 模型各部分的等效材料特性参数(等效密度、等效模量).

利用 MSC/Patran 对简化后的各个部件进行网格划分,薄板部分(碳纤维镜筒)使用板壳元,材料为准各向同性层合板<sup>[2]</sup>,较厚的部位使用十节点四

面体单元,法兰采用六面体实体单元,箱体各孔的加强边缘使用梁单元,零件与零件的装配使用三个 RBE2 刚性单元模拟. 载荷为加速度惯性载荷,作用于整个模型. 包含约束和载荷的有限元模型如图 1. 在实体单元和板壳元对接地方,将板壳单元向实体单元内伸进一个单元(这一点与该组件的加工成型工艺相符),合并重复的节点,这样原先边界处两种单元之间力矩的传递便可进行. 这是目前最简单可行而有效的办法之一. 这种办法虽然增加了一些单元,随之模型质量也会有所增加,但是考虑单元数目较少,单元又比较小,因此与多点约束的方法相比较,误差极小. 零部件对接使用 RBE2 多点约束关系,为每个法兰连接的每一对螺孔都建立一个 RBE2 关系,也就是说,对每一个螺栓都使用一个 RBE2 来模拟. 在这里有一个假设:每个螺栓都是刚性的.

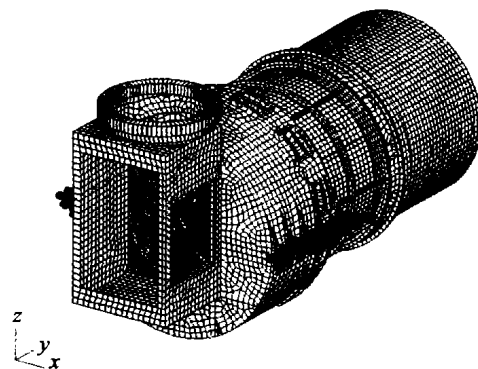


图 1 高分辨率空间相机有限元模型

Fig. 1 Finit element model of high resolution space camera

模型中共包含 52273 个节点,52475 个单元,22 个单元性质集,7 种材料性质(表 1).

有关模型的检查有:

1) 完成了材料的检查;2) 完成了单元连接关系的检查;3) 完成了单元奇异的检查;4) 完成了载荷与约束的检查;5) 根据零件的设计模型,所测设计质量为 204 kg,有限元模型质量 198 kg.

边界条件:由于整个结构是在箱体的耳板处用螺栓固接,对整个耳板进行约束显然会强化结构.

\* 国家 863 - 708 重大专项资助项目

Tel: 029- 88484258 Email: chenrongli169@ sina. com

收稿日期: 2004- 03- 23

表 1 主要零件材料性质列表

零件名称	材料名称	杨氏模量 $E/\text{Pa}$	泊松比 $\mu$	密度 $\rho/\text{kg/m}^3$
箱体、法兰、主镜座	钛合金	1.09E+011	0.34	4430.0
心轴、折转镜座、次镜座	4J32 钢	1.41E+011	0.25	8100.0
内遮光罩	铸铝	7.00E+010	0.33	2800.0
反射镜	微晶玻璃	9.00E+010	0.243	2530.0
承力筒	碳纤维复合材料纤维	8.14E+010	0.322	1630.0
	RTV 硅胶	7.10E+05	0.40	1150.0

在此,我们不考虑 12 个螺栓的破坏,因此只需对螺孔的边进行约束,在此我们对 12 个螺孔实施全约束.

## 2 静力学分析

线性静力分析是结构设计和强度估算的基础,其理论基础为牛顿第三定律,即  $F = -P$ . 对于一个结构而言,该结构所承受的外力与其约束力大小相等,方向相反. 静力分析求解承受静力载荷作用下的结构响应,首先根据结构和所加载荷,利用牛顿第三定律列出结构的力学平衡方程,即有限元基本方程

$$[K]\{u\} = \{P\} \quad (1)$$

其中  $[K]$  为结构的弹性刚度阵;  $\{u\}$  为结构的节点广义位移向量;  $\{P\}$  为结构上的节点载荷向量.

通常,式(1)都是奇异的,要想求解该方程,就

必须利用结构的边界条件对该式进行缩减. 在 MSC. NASTRAN 中,经常利用 SPC、MPC、R-单元进行缩减,从而将式(1)变成一次代数方程组

$$[K_i]\{u_i\} = \{P_i\} \quad (2)$$

进行求解.

XPC 相机在地面工装时,承受重力载荷. 按照工装的实际情况模拟:箱体两侧螺栓固定,承受分别来自  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的自身重力载荷或 9g 的过载,计算应力分布和相机变形. 计算结果表明,相机光轴向上时结构变形较小. 各零部件的应力计算结果也表明重力作用在  $y$  方向时应力较小. 图 2(a)、(b)分别是相机在  $y$ 、 $z$  两方向重力载荷作用下的变形云图.

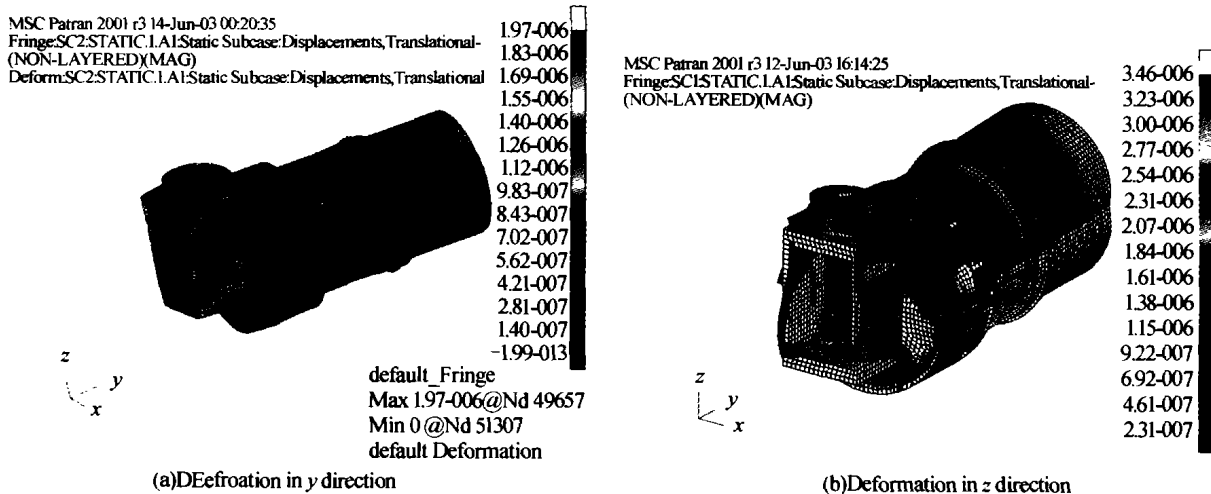


图 2 重力载荷下相机的变形

Fig. 2 Deformation of the camera by gravity load

9g 过载下的变形和应力状况基本与 1g 载荷成比例. 通过两种载荷的六种工况的静力学计算可以看出,最大位移为 0.078 mm,最大应力为 29.8 MPa. 相机的变形在弹性范围内,重力载荷与 9 个 g 的过载不会对相机结构构成破坏. 从六种工况的计算结果看,保持相机的主中心轴与承载方向一致的工装方式会更好一些.

## 3 模态分析

模态分析是高分辨率空间相机研制工作的重要组成部分,这项工作对相机是否满足设计要求,达到

设计性能指标以及最终能否在轨正常工作都具有非常重要的意义. 对相机进行模态分析,是相机光机结构优化设计的基础,可最大限度地减轻相机的重量,保证其刚度及镜面面形,并确保相机能够经受从地面装调试验到轨道空间等一系列力学环境的考验,特别是能够顺利通过严酷的发射力学环境<sup>[4]</sup>. 通过对相机进行模态分析,可验证其结构设计的合理性,并有效地改进设计,为相机后续的力学环境试验及分析与试验的一致性评估等工作提供数据基础.

结构模态的意义可以解释成一种自由运动的位移分布方式. 若不考虑材料阻尼和外力干扰,结构可

以按照这种位移分布方式周而复始地运动,而形成一能量守恒的保守系统. 对于一个离散的结构系统——结构的有限元模型而言,这个系统的质点数量是有限的,该系统的位移状况可以由这有限个质点的位移来描述,因此,一个离散系统的一个模态可以由该系统的质点的位移分量(每个分量为一个自由度)构成的向量来表达. 结构系统以这种向量所描述的位移分布做运动时,这种运动将是一种周期性运动,该周期性运动的频率称为该结构对应于该模态的固有频率. 标准模态是动态分析基础之基础.

对于一个单自由度系统的自由振动而言,具有以下方程

$$M\ddot{u}(t) + Ku(t) = 0 \quad (3)$$

式(3)的解为

$$u(t) = A\sin(\omega_n t) + b\cos(\omega_n t) \quad (4)$$

其中角自然频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (5)$$

所对应的自然频率 $f_n$  则为

$$f_n = \omega_n / 2\pi \quad (6)$$

与单自由度系统相似,对于一般的多自由度结构系统,经过力学分析,其运动方程式可以表示如下

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{P(t)\} \quad (7)$$

式中, $[M]$ 为结构质量矩阵, $[C]$ 为阻尼矩阵, $[K]$ 为刚度矩阵, $\{u\}$ 为位移矢量, $\{P(t)\}$ 为外力函数向量.

对于自由运动而言,我们不考虑外力和阻尼作用,因此式(7)可演变成

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = 0 \quad (8)$$

对于任何线性结构系统而言,式(7)中的 $[M]$ 、 $[K]$ 均为实对称矩阵,求解时,通常假设各部位之振动为简谐运动,即

$$\{u\} = \{\phi\} \sin(\omega t) \quad (9)$$

式中 $\{\phi\}$ 为特征向量, $\omega$ 简谐运动的角频率. 式(9)带入(8),并消去时间项,可得到一实数特征值方程

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = 0 \quad (10)$$

式(10)即求解线性结构系统固有模态的基本方程.

由式(10)可以看出,要想计算非零的特征向量,式(10)中的 $([K] - \omega^2[M])$ 矩阵必须是奇异的. 即

$$\det([K] - \omega^2[M]) = 0 \quad (11)$$

由于结构模型是离散的,因此我们可以求出一组 $\lambda_i = \omega_i^2$ ,从而可以反算出特征向量,根据特征向量计算出结构的振形.

所有约束方式与约束位置、单元类型和数量与前面完全相同. 本次模态计算采用的计算方法为:蓝瑟士法(Lanczos). 表2给出了相机前十阶频率. 可以看出基频大于总体所提出的大于100Hz的要求,且相机具有较大的刚度裕度.

表2 相机的固有频率(Hz)

第1阶	138.5	第6阶	284.9
第2阶	180.4	第7阶	299.5
第3阶	209.9	第8阶	317.9
第4阶	261.9	第9阶	342.4
第5阶	279.8	第10阶	359.5

图3给出了相机前四阶的振型.

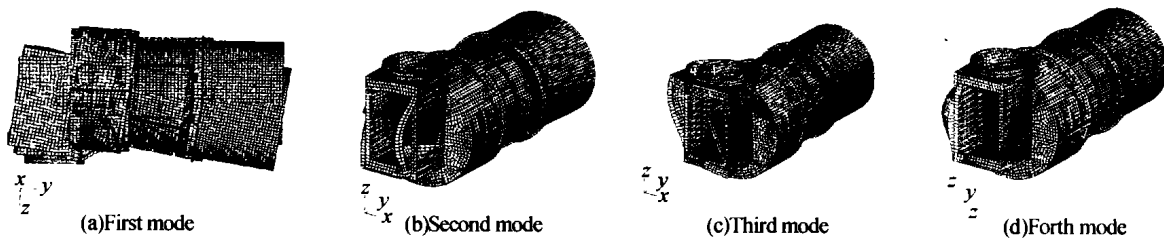


图3 相机前四阶模态

Fig. 3 First four modes of the camera

可以看出相机基频为138.5Hz,模态为绕 $x$ 轴的摆动;第二阶频率为180.4Hz,模态为绕 $z$ 轴的摆动. 三阶和四阶为箱体局部模态,以箱体的屈曲变形为主,附带有其它部分的小量摆动.

## 4 频率响应分析

所谓频率响应分析是指结构在稳态正弦函数形式外力作用下,结构关于频率的响应分析. 这种外力是随着频率的变化而变化的,因此结构在此外力作用下的响应也是频率的函数. 频率响应中经常出现局部峰值和局部谷值,频率响应的峰、谷的分布

可以帮助我们了解结构系统受周期性外力作用时响应较大的频率区间,这些区间也就是外力与结构系统容易产生共振(Resonance)的频率区间.

频率响应分析有两种数值方法,一种是直接法,另一种是时模态法. 在这两种方法中,外力函数都表示为同一频率的函数,因此可以 $e^{i\omega t}$ 代表时间变量,而以复数振幅代表不同作用点间的相位差,故外力向量可以表示成

$$\{P(t)\} = \{P(\omega)\} e^{i\omega t} \quad (12)$$

式中 $P(\omega)$ 代表与时间无关之复数振幅,但可以是频率的函数. 将上式代入运动方程式(5),便可得

$$[M]\{u(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{P(\omega)\}e^{i\omega t} \quad (13)$$

故所得的位移向量也为复数值. 从实际物理意义来看,外力向量可以是(12)的实部或虚部,所以所得的位移向量也可以取复数的实部或虚部.

在直接分析方法中,位移向量假设为同一频率的复数函数

$$\{u(t)\} = \{u(\omega)\}e^{i\omega t} \quad (14)$$

则速度向量和加速度向量可表示为

$$\{\dot{u}(t)\} = i\omega\{u(\omega)\}e^{i\omega t} \quad (15)$$

$$\{\ddot{u}(t)\} = -\omega^2\{u(\omega)\}e^{i\omega t} \quad (16)$$

$$(-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K])\{u(\omega)\} = \{P(\omega)\} \quad (17)$$

这便是直接频率响应分析的基本方程. 将频率驱动的外力函数代入上式,可以求出位移的响应值,将位移的响应值代入式(15)、(16)便可求出速度、加速度的响应值. 式(18)为频率响应分析的模态法基本方程

$$(-\omega^2[\phi]^T[M][\phi] + i\omega[\phi]^T[C][\phi] + [\phi]^T[K][\phi])\{\xi(\omega)\} = [\phi]^T\{P(\omega)\} \quad (18)$$

其中

$$[\phi]^T[M][\phi] = \text{模态(广义)质量阵}$$

$$[\phi]^T[C][\phi] = \text{模态(广义)阻尼阵}$$

$$[\phi]^T[K][\phi] = \text{模态(广义)刚度矩阵}$$

$$[\phi]^T\{P(\omega)\} = \text{模态(广义)外力向量}$$

该方程仍为耦合方程,其非耦合方程为

$$-\omega^2 m_i \xi_i(\omega) + i\omega c_i \xi_i(\omega) + k_i \xi_i(\omega) = p_i(\omega) \quad (19)$$

式中,  $m_i, c_i, k_i$  分别为第 I 个模态的广义质量、广义阻尼和广义刚度,  $p_i$  为广义外力向量的第 I 个分量. 所以

$$\xi_i(\omega) = \frac{p_i(\omega)}{-m_i\omega^2 + ic_i\omega + k_i} \quad (20)$$

求出  $\xi_i(\omega)$  后,便可求出位移响应值及速度、加速度响应值.

对于频率响应的外力函数而言,其输入项应包含不同载荷作用点的振幅与相角的变化以及不同的驱动频率的变化等. 在 MSC. NASTRAN 中,动态载荷向量是由若干个载荷子集合成的,即

$$\{P(\omega)\} = \sum_k S_k \{P_k(\omega)\} \quad (21)$$

式中  $\{P_k(\omega)\}$  为第  $k$  个载荷子集,  $S_k$  为该子集在合成载荷中所占的比例. 载荷子集的形式为

$$\{P_k(\omega)\} = \{A_k e^{i(\theta_k - \omega\tau_k)}\} G_k(\omega) \quad (22)$$

式中,  $A_k, \theta_k$  与  $\tau_k$  分别为放大系数、相角和时间迟滞. 这些系数随着自由度的不同而异.  $G_k(\omega)$  为与频率相关的复数函数.

采用大质量法 + 模态法,假设各模态阻尼比例为  $\zeta = 3\%$  的计算结果包括两个部分:一是频率响应分

析,二是随机振动分析. 其中随机振动分析作为频率响应分析的进一步后处理进行. 图 4(a)、(b)分别给出了观察点的加速度响应曲线和位移响应曲线.

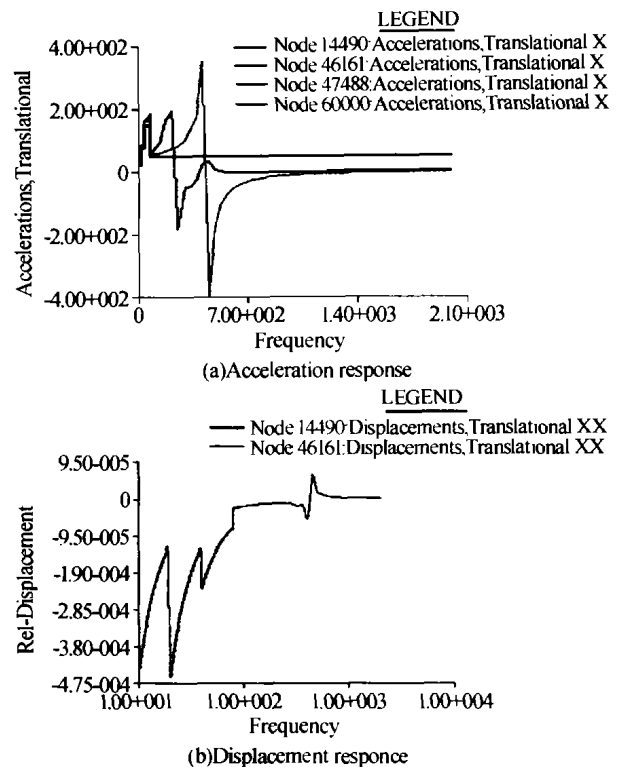


图 4 相机频率响应  
Fig. 4 Frequency response of the camera

## 5 试验结果

我们利用锤击法测了模态,在振动台上进行了正弦扫描,并参照某星的验收级标准进行了 0.6 倍降额的随机振动试验. 实验结果表明,相机一阶弹性模态自由悬挂状态下为 152.99 Hz,并且垂直和水平方向差别不大. 振动试验在 2XSA60-T1000-32WL 振动试验系统上进行. 根据要求,对相机结构系统进行 X、Y、Z 三轴向正弦扫描,共振点检查和随机振动. 一阶模态在 133 Hz 左右,从振动试验的测试结果看,最大应力均小于 100 Mpa,这对于现有的材料均是安全的,且裕度较大.

试验结果表明,计算的结果与试验结果误差在 10% 以内,因阻尼的存在,响应峰值与固有频率稍有偏离. 试验结果进一步证明了对有限元模型处理的正确性和分析计算的有效性. 为高分辨率相机光机结构的改进提供了有力的手段和科学的依据. 利用 CAE 技术进行高分辨率相机的设计,可以节约成本,降低风险.

### 参考文献

1 孙继文,傅丹鹰,凌伟. 轻型空间 CCD 相机模态分析及构建建模方法研究. 星载轻型高分辨率光学遥感技术论文集, 2002, 11: 100 ~ 106  
Sun J W, Fu D Y, Ling W. *Lightweight High Resolution*

- Satellite-based Optical Remote Meeting* 2002, **11**: 100 ~ 106
- 2 初昶波,周绍祥. 碳纤维增强复合材料反射镜的刚度分析. *光子学报*, 2004, **33**(2): 240 ~ 243  
Chu C B, Zhou S X. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 240 ~ 243
- 3 甘瞬仙. 有限元技术与程序. 北京:北京理工大学出版社, 1988. 12
- Gan Shunxian. *The Finite Element Techniques and Program*. Beijing: Beijing Technology University Press, 1988. 12
- 4 陈荣利,张禹康,樊学武,等. 空间高分辨率 CCD 相机次镜支架最佳结构设计. *光子学报*, 2004, **33**(10): 1251 ~ 1254  
Chen R L, Zhang Y K, Fan X W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1251 ~ 1254

## Engineering Analysis on High Resolution Space Camera

Chen Rongli<sup>1</sup>, Zhao Xinmin<sup>2</sup>, Xie Yongjie<sup>1</sup>, Ma Zhen<sup>1</sup>, Fan Xuewu<sup>1</sup>, Li Yingcai<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710068

<sup>2</sup> Shannxi Shengying Science & Technics Co., Xi'an 710049

Received date: 2004-03-23

**Abstract** Large CAD software SolidEdge was used to make smart models of a high resolution space camera, and based on the model 3D FEA model has been established using MSC/Patran, and engineering analysis has been performed. The results show that the difference between analysis and examination is less than 10%. Furthermore analysis results were used to verify and improve the structural design effectively.

**Keywords** High Resolution Space Camera; FEM; Engineering analysis



**Chen Rongli** an associate professor, was born in 1973, in Shaanxi Province, China. He received the Master degree in 1999 from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Now he is working as a Ph. D. candidate in Space Optics Lab. His interest is space optical remote sensing.