

121-127

第4卷第5期  
1996年10月光学 精密工程  
OPTICS AND PRECISION ENGINEERINGVol. 4, No. 5  
October, 1996空间遥感相机支架结构的  
动态特性分析及优化TP73  
TB853.29李丽 武克用 卢鐸  
(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**A** 摘要 以相机及其支架结构的整体系统为研究对象, 针对支架结构, 采用 CAE 的建模和仿真手段探讨了系统的动态特性; 对发射过程及工作状态中各种机械载荷的激励作用下的位移的应力响应进行了模拟仿真, 对原有设计方案中支架的结构、材料和阻尼等参数进行了改进; 在对设计方案可行性评价的基础上, 进行了优化设计; 为空间相机支架结构的实际工程设计提供了一定的参考及依据。

关键词: 空间遥感相机; 计算机辅助工程; 动态刚度; 有限元法; 优化设计

21  
1 引言

空间相机支架结构是空间相机与运载体的过渡机构, 外界机械干扰将通过支架结构传递给相机。空间相机的动力学特性与支架结构的好坏关系非常密切。因此, 相机支架结构必须具有良好的动力学特性, 具备足够的动态刚度, 使外界激励传递到相机而产生的有害影响降低到最小, 以保证相机在工作状态下视轴稳定; 此外, 在相机发射及运载过程中将经历冲击过载的力学环境, 相机的支架结构必须经得起考验, 保证相机光、机、电组件完好无损, 并能使相机保持在地面已装调好的正确位置而能正常工作。本文根据有限元法和优化设计相结合的基本原理, 通过对空间相机支架结构和相机系统及工作环境的模拟, 建立系统的物理模型, 通过有限元等数值计算手段, 探讨了空间相机支架结构乃至整个系统的动力学特性和动能、应变能的分布情况, 并且求解了各种动态载荷下的应力和位移响应, 进行强度和刚度校核, 进而得出光学系统重要性能参数 (本文主要讨论主反射镜和次反射镜相对位移及象面位移) 响应曲线, 并与设计要求指标相比较, 提出改进方案。通过分析—改进—分析的迭代过程得到可行性方案, 并在方案可行的前提下进行以提高动态刚度、轻量化为目的的优化设计, 得出最优方案。本文采用的是 CAE (计算机辅助工程) 的设计手段。应用的是美国 ANSYS 有限元分析软件, 是在 APOLLO 工作站上完成的。

## 2 工程分析模型的建立

## 2.1 建立物理模型

收稿日期: 1996年8月5日

在建立物理模型时,应在依据系统实际几何和物理构造,依据结构的质量和刚度分布的前提下,兼顾计算精度的要求和计算机的容量及速度,大体上确定单元及划分网格的疏密程度。本论文将有限元模型节点数目限制在 2000 以内,对于应力和位移变化梯度较大的部位,单元划分较密,对于低应力和次要部位予以简化。根据选取主自由度的原则,共选取 158 个主自由度。将支架与飞船的连接处进行全约束处理,动力载荷将全部从基础输入。

## 2.2 建立数学模型

### (1) 建立动力学方程

将弹性结构离散化后,单元的势能:

$$\Pi = U + V = \int_V \{\epsilon\}^T \{\sigma\} dv - \int_V \{p\}^T \{u\} dv - \int_s \{q\}^T \{u\} ds - \{G\}^T \{u\} \quad (1)$$

式中  $\{u\}$  表示单元内任意点  $N$  的位移矢量;  $\{p\}$ ,  $\{G\}$ ,  $\{q\}$  分别表示作用在该点上的体力矢量、集中力矢量和作用在单元边界  $s$  上的面力矢量。

故对于质量密度为  $\rho$  的单元,在计入动力学因素后整个单元的瞬时总势能可表示为

$$\Pi = U + V = \int_V \left( \frac{1}{2} \{\epsilon\}^T \{\sigma\} + C \{u\}^T + \rho \{u\}^T \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{u\} - \{P\}^T \{u\} \right) dv - \int_s \{q\}^T \{u\} ds - \{G\}^T \{u\} \quad (2)$$

进而得单元瞬时总势能:

$$\Pi = \langle \{\delta\}^r \rangle^T [m] \{\ddot{\delta}\}^r + \langle \{\delta\}^r \rangle^T [C] \{\dot{\delta}\}^r + \frac{1}{2} \langle \{\delta\}^r \rangle^T [K] \{\delta\}^r - \langle \{\delta\}^r \rangle^T \{F\}^r \quad (3)$$

其中  $[m]$ ,  $[c]$ ,  $[k]$  分别为单元的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,  $\{F\}^r$  为移置到单元节点上的等效载荷矢量。

根据最小势能原理对式 (3) 取变分,可得单元动力学方程的一般表达式:

$$[m] \{\ddot{\delta}\}^r + [c] \{\dot{\delta}\}^r + [k] \{\delta\}^r = \{F\}^r \quad (4)$$

进而得到整个结构的动力学方程:

$$[M] \{\ddot{\delta}\} + [C] \{\dot{\delta}\} + [K] \{\delta\} = \{F\} \quad (5)$$

$\{F\}$  为动力载荷,本论文主要讨论冲击载荷,正弦载荷及随机振动。

### (2) 动力载荷的数学表示

#### a. 冲击载荷

冲击载荷方程为

$$F(t) = \begin{cases} 4g \sin(\pi/0.01t) & \text{(横向, } t \leq 10 \text{ ms)} \\ 5g \sin(\pi/0.01t) & \text{(纵向, } t \leq 10 \text{ ms)} \end{cases}$$

#### b. 正弦载荷

正弦载荷从基础输入,激励振动幅值  $v(t) = v_0 \sin \omega t$ , 其中

$$v_0 = \begin{cases} 5.5 \text{ mm} & 4 \text{ Hz} < f < 8 \text{ Hz} \\ 1.408 \text{ mm} & 8 \text{ Hz} < f < 600 \text{ Hz} \\ 6 \text{ g} & 20 \text{ Hz} < f < 100 \text{ Hz} \end{cases}$$

#### c. 随机振动的描述

随机振动载荷可用功率谱密度表示,本文所讨论的随机振动频率范围为 10 Hz ~ 2000 Hz,功率谱密度函数可表示为

$$\text{PSD} = \begin{cases} 6 \text{ db/oct} & 10 \text{ Hz} < f < 100 \text{ Hz} \\ 0.09 \text{ g} & 100 \text{ Hz} < f < 600 \text{ Hz} \\ -8 \text{ db/oct} & 600 \text{ Hz} < f < 2000 \text{ Hz} \end{cases}$$

### 3 动态特性分析与响应求解

#### 3.1 模态分析

当支架结构如图1所示时, 支架及相机系统的前四阶固有频率分别为19.31 Hz、52.83 Hz、104.1 Hz、107.5 Hz。从模态分析的结果知: 一、二阶振型为相机沿 X 向和 Z 向的侧向振动。这是因为支架结构的四个支脚相当于类似于悬壁梁的结构, 沿 X 及 Z 方向动态刚度较低, 第三阶振型为次镜结构的绕 y 轴的旋转振动。次镜座支撑结构为三根径向分布的筋板, 导致次镜结构绕 y 轴转动刚度较差。需要说明的是次镜绕 y 轴的旋转振动对于成像质量影响不如绕径向轴转动的影响大, 故第三阶振型对光学系统性能参数不会造成十分有害的影响。第四阶振型为相机的轴向振动并伴有相机上部沿 Z 向的振动。这说明支架结构的轴向刚度略优于侧向刚度。同时, 校正镜室主要靠两块校正镜来增加刚度, 不象主镜室处有主镜心轴及调焦镜桁架直接与主镜室后突起处相连接, 且中筒内无刚性支承结构, 故导致相机上部刚度稍差。通过模态分析可知, 支架结构沿 X 向和 Z 向的动态刚度较低, Y 向的动态刚度略优于 X 向和 Z 向刚度。为防止共振发生, 应尽量使仪器避开前四阶频率, 同时, 提高支架结构的动态刚度, 以达到减小位移响应的目的。

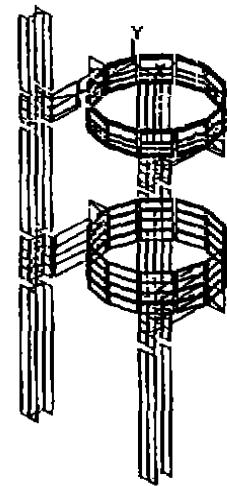


图1 支架结构一

Fig. 1 Supporting structure 1

#### 3.2 响应求解及可行性分析

##### (1) 响应求解与结果分析

通过对冲击响应、正弦振动响应、随机振动响应的求解, 得到了各种环境条件下系统的最大位移响应及最大应力响应, 分别见表1及表2。

Table 1 Maximum Displacement Response

Variables	Design requirements	Self weight displacement	Sine vibration response	Random vibration response
Displacement between primary mirror and minor mirror	UX1	0.005 mm	0.626E-5 mm	0.205E-7 mm
	UY1	0.02 mm	0.136E-2 mm	0.205E-7 mm
	A1	3.2"	1.86"	-8.06"
Displacement of focus plane	UY2	0.02 mm	-0.873E-3 mm	-0.141E-4
	A2	2"	0.5E-3	-3.5"

Table 2 Maximum Stress Response

Loading way	Permitted stress (kg/mm)	Maximum stress (kg/mm)	Safety coefficient	Position
Static	25.3	0.24	100	Beam
Compact	25.3	1.25	20	Beam
Sine	25.3	2.41	11.5	Beam
Random	25.3	0.44	50	Beam

通过上表可以看出,在发射过程中,系统内的最大应力发生在支架上,且其值远小于许用应力(微屈服极限,即使材料发生百万分之一塑性应变的应力),因此该支架结构在由地面升入太空的发射过程中能够保证相机的绝对安全。支架结构在频率为4 Hz—8 Hz,幅值为5.5 mm的低频载荷作用下动态刚度较差,系统最大响应为对应于第一、四阶固有频率下的响应,这也说明了支架结构在Z向和轴向的动态刚度较低,尤其是第四阶振型同时还发生相机上部的侧向振动,而导致主次镜倾斜角较大,较大程度地影响光学系统性能。

通过随机响应谱分析,可知随机振动的响应基本满足设计要求,这就说明响应的功率谱密度在较广的频域内分布较为均匀,没有能量集中的情况,即系统抗随机载荷性能较好。

### (2) 可行性分析的初步结论

通过对结构的动力载荷响应的计算及对强度和刚度的分析,可以看出图1所示的支架结构(结构一)在冲击载荷和随机载荷作用下完全满足设计要求,在低频振动作用下的位移响应不满足刚度要求,相机的光学系统的性能会受到较大影响,因此可以对此结构进行改进以提高其动态刚度。

## 3. 3 对改进支架结构动态特性的探讨

### (1) 动态特性的改进依据

由式(1):  $\Pi = U + V$  可知,机械系统在振动过程中,除激励输入的能量外,还有振动系统的惯性能(动能)和弹性能(势能)。惯性能分布体现了系统各组件的质量分部情况,弹性能分布体现了各组件刚度分配情况。由最小势能原理知,在给定外力的作用下,真实的一组位移应使  $\Pi$  取得最小值。所以对于一个具有较好的动态特性的结构,其能量的分布应当较为均匀,这样可以避免由于局部能量集中而产生能量释放。在式(1)中

$$U = 1/2 K \delta^2$$

$$V = 1/2 m \delta'^2$$

其中  $\delta$  和  $\delta'$  分别为节点位移及速度,因此,应变能较大的地方要么是变形较大的地方,即刚度较差的地方,要么就是应力较大之处;动能较大的地方,也是质量分布较为集中的地方。因此对应变能分布率较高的地方应当提高其刚度,对动能较高的地方应当降低其质量。这是改进支架结构动态特性的依据。

### (2) 动态特性的改进手段:

以单自由度系统为例来研究改进动力学特性的手段。

由式(1)可以得出单自由度系统动力学方程为:

$$m\ddot{\delta} + c\dot{\delta} + k\delta = F(t) = F_0 \sin \omega t \quad (6)$$

式中  $F_0$  为激励振幅

$\omega$  为激励频率

解之得:

$$\delta(t) = A^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \varphi) + \beta \frac{F_0}{k} \sin(\omega t - \varphi) \quad (7)$$

其中  $\omega_n$  为系统固有频率

$\zeta = c / (2 m \omega_n)$  为阻尼比

$\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2}$  为谐振频率

$\beta = \frac{X}{X_0}$  为放大因子

式 (7) 右端第一项为结构在阻尼作用下的衰减振动, 第二项为简谐振动引起的强迫振动是结构在简谐激励下的稳态响应。

式 (7) 中

$$\beta = \frac{X}{X_0} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (8)$$

式中  $\lambda = \omega / \omega_n$  为频率比

通过式 (8) 可以绘制幅频特性曲线, 由该曲线上可以看出改进支架的动态特性, 可以采取两种手段:

- a. 提高支架动态刚度从而提高系统固有频率。
- b. 增加系统阻尼

当  $\lambda$  接近于 1 时, 适当增加阻尼比可以使响应明显降低。

综上所述, 改变结构的固有频率和阻尼比是改变动力响应的两种重要手段, 而  $\omega_n = \sqrt{K/m}$  即固有频率决定于系统质量和刚度的分布, 因此改善支架的结构形式、尺寸及材料将改变系统固有频率, 同时  $\zeta = C/(2m\omega_n)$  因此适当改变阻尼系数, 也将使系统获得理想的动态特性。

(3) 具体改进措施

- a. 从结构形式上改进

由模态分析和响应谱分析可以看出支架结构在  $X$  向、 $y$  向和  $z$  向的动态刚度较低, 为了提高支架结构  $x$  方向的动态刚度, 可以在工字梁和环套之间安装四条筋, 为提高的  $Z$  向和  $Y$  向的动态刚度可以横向再加两条工字梁, 如图 2 所示。

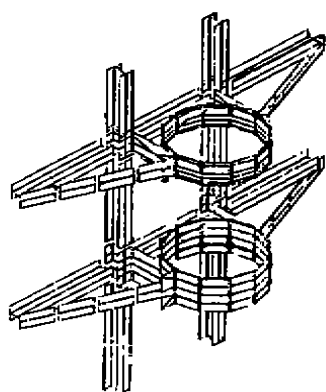


图 2 支架结构二

Fig. 2 Supporting Structure 2

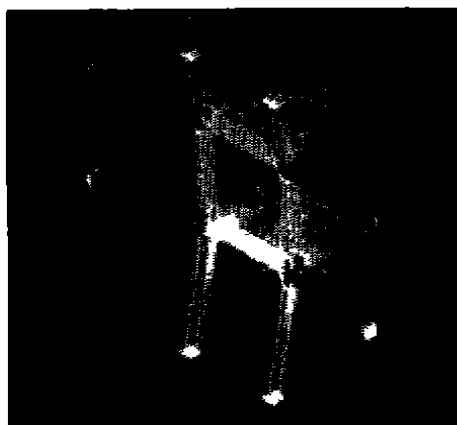


图 3 应变能分布

Fig. 3 Strain Energy Distribution

经过计算,采用改进后的支架结构,系统的一阶固有频率从19.31 Hz 上升到56.2 Hz,动态刚度明显提高。在低频载荷作用下位移响应已符合刚度标准,在其它各种激励载荷作用下位移和应力响应完全满足刚度和强度要求。这说明该支架具备良好的动态性能。

#### b. 改变阻尼

在主支承与相机连接处加入阻尼材料,在基础与支架相连处加入减振装置,系统在正弦振动作用下的应变能分布图,如图3,可以看出,阻尼增强后,应变能将会集中到阻尼材料上,即阻尼材料起到了吸收能量的作用。

## 4 结构的优化

为获得支架结构的最优设计方案,对支架结构进行优化设计,以结构的固有频率为目标函数,以支架结构为状态变量进行优化,得到最优方案。与优化前相比,最优方案的一阶固有频率提高到58.5 Hz,重量减轻8%,达到优化目的。

## 5 结 束 语

本文通过对空间遥感相机支架结构的动态特性分析,探讨了影响支架结构动力学特性的各种因素,找到了提高仪器动态刚度、降低响应的途径,并对支架结构的结构形式、材料和阻尼等参数进行了改进,得到了可行方案,并在此基础上进行了优化设计,得到了最优方案,达到了提高刚度,减轻重量的目的,为实际工程中支架结构的参数选择提供了积极的、有价值的参考。

由于本文采用CAE手段进行计算机模拟仿真,因此在将系统从实体模型简化到物理模型及从物理模型转化为数学模型的过程中,不可避免地会存在误差,这需要在工程设计中加以考验和验证。此外,若能将计算机仿真与实验测试手段相结合,研究结果将会更加理想。

### 参 考 文 献

- [1] L. W. Hodge and J. A. Breakwell, Space Optical system active vibration suppression, Proc SPIE, 1987 (748), 121-130
- [2] Aven. J. Bronowicki, Structural Modification to Minimize Response of Electro-Optical Systems to Random Excitation. Proc. SPIE, 1985, (748): 91-98
- [3] David. R. Dearth, Specifying Random Vibration Severity. Machine Design, 1985: 61-72
- [4] V. B. Venkayya and Victoria A. Tischler, Frequency Control and the Effect on the Dynamic Response of Flexible Structures. 25th AIAA Structures Dynamics and Materials Conferee, Lake Tahoe CA, 1984: 89-105
- [5] 傅志方, 振动模态分析与参数辨识. 北京: 机械工业出版社, 1989: 128-152

## Dynamic Analysis and Optimum Design of the Supporting Structure of Space Remote-Sensing Camera

Li Li, Wu Keyong, Lu E

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

### Abstract

The support structure, as a key component of linking the Space camera with shuttle greatly influences the system dynamical property. So the support structure must be of enough dynamical stiffness. Taking the camera and the support as research object, aiming at the support structure, this paper probes into dynamical property of the system by means of modelling and emulatin of CAE. This Paper also calculates the displacement and stress response of shock, acceleration and various mechanical load in working state. And in this paper, the modification of the structure, material, dimensions, damp and other parameters of the support structure is carried out. On the basis of the modified design scheme, optimum design is accomplished. This paper provides certain reference for SRSC support structure design in the practical engineering.

**Key words:** Space Remote-Sensing Camera, CAE, PEM, Dynamical stiffness, Optimum design

李 丽 女, 1971年10月出生, 1996年4月获工学硕士学位, 参与了空间相机工程的研究与设计工作。