

# 由热弹性分析探讨空间遥感相机 结构形式

林春福 卢 镔 卫丕昌

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 借助于计算机辅助工程分析手段, 对空间遥感相机几种不同的次镜座形式、材料选择、约束方式进行了热弹性分析和比较, 分别计算了各种结构形式下的位移、变形、应力及应变能分布, 进而求得了影响光学元件的倾斜和平移的薄弱环节, 找到了满意的结构形式。对改进相机的设计提供了有用的参考。

**关键词:** 空间相机; 工程分析; 热弹性; 位移

## 1 引 言

空间遥感相机为高精度的摄影系统, 为满足在空间环境条件下具有良好的光学性能, 要求相机结构设计成具有刚度高、重量轻及尺寸稳定的性能。

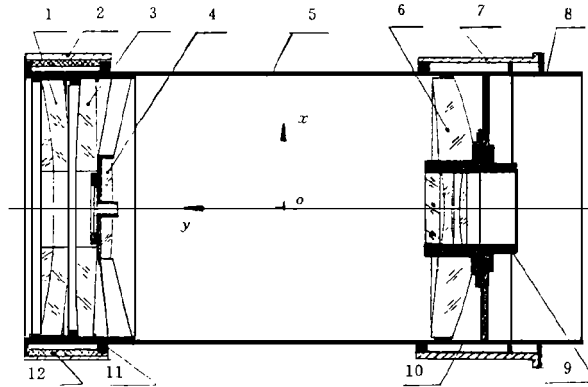
相机除了受到过载、失重、冲击振动等机械载荷作用, 还受到由于环境温度变化、电器发热等带来的热载荷作用。对于高精度的空间遥感相机来说, 温度的波动对其光学系统的影响是一个不可忽视的重要因素, 有时甚至产生不可想象的“破坏作用”。如果相机材料的线胀系统不匹配、结构不合理或约束方式选择不当, 都会使光学部件产生较大的位移和变形(倾斜、平移、表面畸变等), 从而使光学系统的像质下降, 甚至不能正常工作。因此, 各国都对空间遥感相机在恶劣温度条件下如何保证尺寸稳定极为重视, 并做为一项关键技术而严加保密。

本文采用计算机辅助工程分析(CAE)手段, 利用数值方法针对几种不同的支架材料、次镜座形式和主辅支承处的约束方式, 进行了有限元法的建模及在环境均匀温升作用下的热弹性计算, 进而求得了光学部件的位移、应力及应变能等。通过分析比较, 找到了合理的结构形式, 达到了优选方案、优化设计的目的, 为今后改进设计提供了科学的参考。

## 2 结构形式

### 2.1 相机初始结构形式

主镜和次镜均采用中心支撑方式,主镜周边还有六点辅助支承,在主镜端用环套刚性固定在基座上(主支承),在校正镜端用环套内衬减振材料作弹性支撑(辅助支承),也固定在基座上。次镜座采用图2A所示结构形式。相机结构示意图见图1。



1 corrector 1 2 auxiliary support ring 3 corrector 2 4 secondary m irror 5 m iddle barrel 6 primary mirror 7 main support ring 8 body 9 focus control 10 barrel of primary mirror 11 barrel of correctors 12 vibration damper

Fig 1 Camera scheme

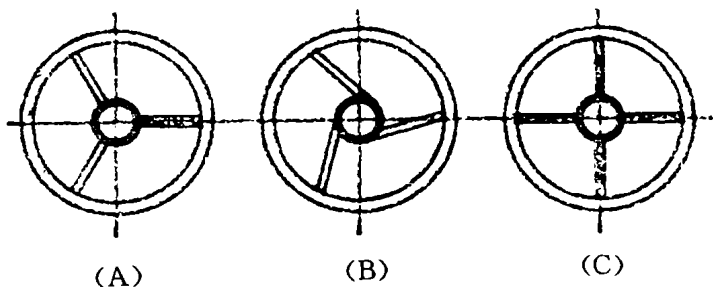
Table 1 Properties of Materials

properties materials	density $\rho(\text{kg}/\text{mm}^3)$	elastic modulus $E(\text{kg}/\text{mm}^2)$	poisson's ratio $\mu$	coefficient of temperature linear expansion $\alpha$	distribution
LY12	0.28E-5	7100	0.33	0.227E-4	support rings ect
ZTC4	0.44E-5	11400	0.29	0.88E-5	barrels
K9	0.253E-5	8132	0.209	0.75E-5	primary m irror, secondary m irror and correctors
4J45	0.818E-5	14700	0.25	0.70E-5	central rings of m irrors
* RTV	0.115E-5	0.071	0.4	0.236E-3	auxiliary support of primary m irror etc
45#	0.781E-5	20000	0.26	0.1159E-4	base
* Rubber	0.253E-5	1.152	0.4	0.10E-3	vibration damper

The \* are for reference only.

## 2.2 次镜座结构形式

为减少拦光和提高刚度,次镜座一般采用轮辐式结构。为探讨不同结构形式的优劣,本文采用三种不同的次镜座结构进行了分析。它们是:三条轮辐径向布置;三条轮辐相切布置;四条轮辐径向布置。各结构示意图见图2。



A. three spokes arranged radially

B. three spokes tangent to central ring

C. four spokes arranged radially

Fig. 2 Scheme of secondary mirror's base

## 2.3 约束方式

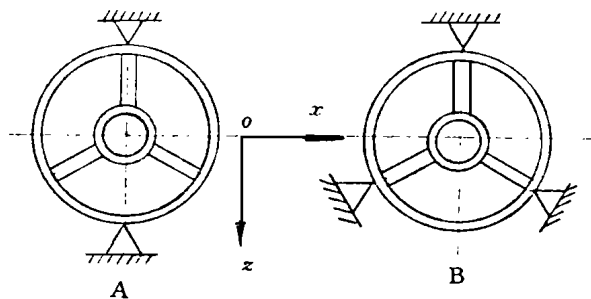
为探讨不同约束方式对光学系统的影响,本文作了以下几种约束方式的模拟计算:

方式一:约束主支承和辅助支承沿光轴方向的自由度。

方式二:约束主支承沿光轴方向的自由度,而释放辅助支承沿光轴方向的自由度。

方式三:在主支承与辅助支承处,采用如图3A所示的两点约束方式。

方式四:在主支承与辅助支承处,采用如图3B所示的三点约束方式。



A. two points constrain

B. three points constrain

Fig. 3 Constrain methods

## 2.4 材料的选择

本文重点探讨了在温度载荷作用下,支承环套材料的不同选择对相机应力和应变能分布的影响,从而找到最佳的材料匹配。对于其它部分的材料匹配问题,在不同的结构方式分析中均得到了检验。

## 3 环境条件

给定相机工作环境温度变化范围为 $21 \pm 4$ 。热传递方式以传导为主,辐射为辅,没有对流。

## 4 FEM (有限元法) 模型

根据相机实际结构形式, 通过适当的力学简化, 按有限元分析程序 ANSYS 提供的单元类型建立了分析模型。根据各部分不同的结构特点分别采用了不同的单元类型, 通过适当的约束并采用弹簧单元来模拟实际支承所产生的约束效果。

## 5 计算结构和分析

根据分析目的与所拟定的不同次镜座形式、约束方式和材料选择, 用有限元分析程序 ANSYS 在 APOLLO 工作站上对几种结构组合进行了均匀温升- 4 的热弹性分析计算和计算机模拟计算。

### 5.1 两点约束和三点约束的分析与比较

本节对次镜座三条轮辐径向布置(初始设计), 主、辅支承处采用两点约束方式与3点约束方式(将光轴方向自由度约束)的结构形式进行了分析, 得到了各节点位移值, 进而求得了光学元件的刚体位移。如表2所示。

Table 2 Rigid body displacements of optical components when three spokes of secondary mirror's base are arranged radially

components		primary mirror	Secondary mirror	corrector 1	corrector 2
displacements					
off-axis displacements (mm)	two points constrain	- 0.5982E- 5	- 0.6146E- 2	0.4970E- 5	- 0.3613E- 5
	three points constrain	0.4789E- 5	0.1375E- 3	- 0.3506E- 6	- 0.3576E- 6
axial displacements (mm)	two points constrain	- 0.311E- 2	- 0.1991E- 1	0.2018E- 1	- 0.1441E- 1
	three points constrain	- 0.2214E- 3	- 0.4021E- 1	- 0.2109E- 1	- 0.1045E- 1
tilts (second)	two points constrain	0.0043	8.6080	0.0138	0
	three points constrain	0.4807	4.7520	0	0.0987

由表2中数据可见, 对相同的结构形式, 3点约束方式除了沿光轴的位移略大外, 其它指标均优于2点约束。尤其是次镜的倾斜, 3点约束仅是2点约束的一半, 这对像质是极为有利的。因此, 约束方式应选用3点约束。

### 5.2 次镜座三条轮辐相切布置与径向布置的分析比较

本节对主、辅支承处均采用两点约束方式, 次镜座三条轮辐分别采用相切布置与径向布置的形式进行了分析, 求得了光学元件的刚体位移。如表3所示。

**Table 3 Rigid body displacements of optical components when different scheme of secondary mirror's base is of three points constrain**

components		primary mirror	Secondary mirror	corrector 1	corrector 2
displacements					
off-axis	tangent to arranged radially	0.6994E-5	-0.3648E-2	-0.4173E-7	-0.4392E-6
axial	tangent to arranged radially	-0.5982E-5	-0.6146E-2	0.4970E-5	-0.3613E-5
displacements (mm)					
axial	tangent to arranged radially	0.3117E-2	-0.1281E-1	-0.1974E-1	-0.143E-1
displacements (mm)					
tilts	tangent to arranged radially	0.3110E-2	-0.1991E-1	-0.2018E-1	-0.1441E-1
(second)					
tilts	tangent to arranged radially	0.0022	3.7875	0	0
(second)					
tilts	tangent to arranged radially	0.0043	8.6080	0.0138	0

由表3的比较可以看出,次镜座轮辐相切布置明显优于径向布置,尤其次镜的倾斜不到径向布置时的一半。因此,应选用相切布置方式,因为该结构能将由于热载荷作用而产生的热力偶转化为转动转矩,从而可减小结构沿光轴方向的畸变,而光学系统对光学元件的转动是不敏感的。

### 5.3 两种辅助支承约束方式的比较

为弄清辅助支承采用何种约束方式更佳,本节对下面两种约束方式进行了分析:一种将辅助支承处2个约束点沿光轴方向的自由度约束,即 $U_Y = 0$ ;另一种是将辅助支承处2个约束点沿光轴方向的自由度释放,即 $U_Y \neq 0$ 。两种约束方式中次镜座三条轮辐均采用径向布置。两种方式的分析结果如表4所示。

**Table 4 Rigid body displacements of optical components when auxiliary support is of different constrain**

components		primary mirror	Secondary mirror	corrector 1	corrector 2
displacements					
off-axis	$U_Y = 0$	0.6994E-5	-0.3648E-2	-0.4173E-7	-0.4392E-6
axial	$U_Y = 0$	0.6520E-5	0.1177E-3	-0.12570E-6	-0.3885E-6
displacements (mm)					
axial	$U_Y = 0$	0.3110E-2	-0.1991E-1	-0.2018E-1	-0.1441E-1
displacements (mm)					
tilts	$U_Y = 0$	-0.2096E-2	-0.2786E-1	-0.3221E-1	-0.2742E-1
(second)					
tilts	$U_Y = 0$	0.0043	8.6080	0.0138	0
(second)					
tilts	$U_Y \neq 0$	0.0011	0.6886	0	0

由表4中数据可知,释放 $U_Y$ 约束会使次镜的倾斜大大减小,这对光学系统的像是极为有利的。但同时看到,该约束方式会使次镜和校正镜沿光轴平移量增大,为避免产生过大的平移,同时又不使次镜倾斜过大,在安装时辅助支承应采用柔性支承方式,使相机沿光轴方向能

“自由伸缩”，同时应采用合理的温度补偿结构，避免主、次镜产生过大的平移。

图4显示了辅助支承处 $U_Y=0$ 和 $U_Y \neq 0$ 两种约束方式的变形剖面图。

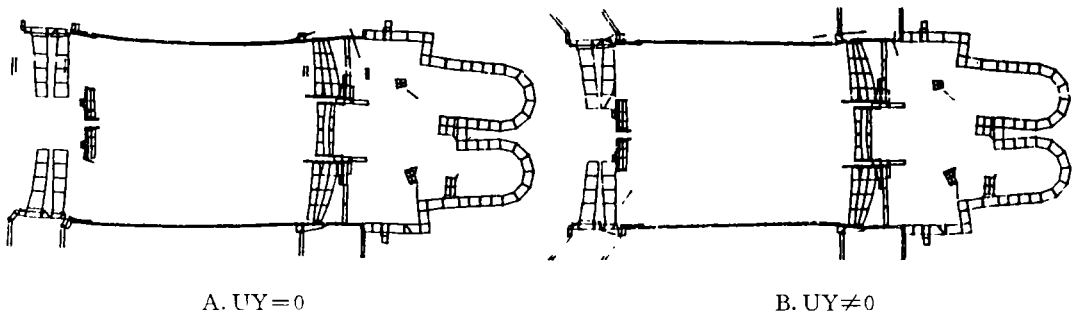


Fig 4 The section of deformed camera when auxiliary support is of different constrain

#### 5.4 材料的选择

从以上各种分析中看到，相机镜头部分的材料匹配都很好，没有因为材料匹配问题而产生应变能集中，尤其是主镜辅助支承和次镜座外圈的RTV胶起到了吸收变形能的作用。但是机身外壳（铸钛）和输片箱外壳（铝合金）联接处由于材料不匹配而产生很大的应变能集中，应引起重视。

本节重点针对支承环套材料两种不同选择，作了单元仿真实验。本实验模型由支承环套、减振垫、镜筒和基座（工字钢）组成。减振垫用橡胶，镜筒为铸钛，基座为45#钢。

首先，环套材料选用铝合金。由应力矢量图（见图5A）可见，主、辅支承处均产生较大的热应力集中，主支承处由于没有减振垫，其热应力大于辅支处的应力。

然后，将支承环套材料改为铸钛。由应力矢量图（见图5B）可见，主、辅支承处的应力均较前者小，且分布较均匀，只有少量的应力集中。尤其是主支承处应力分布非常均匀，这对主镜是有利的。

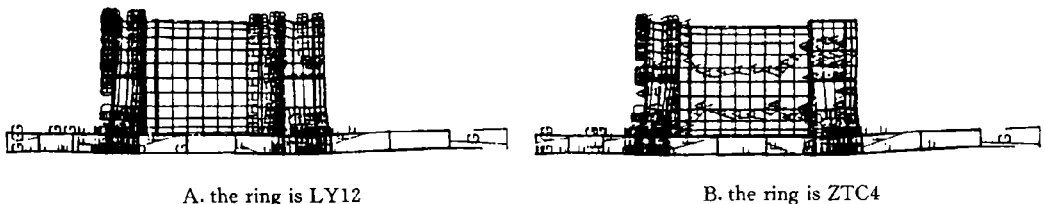


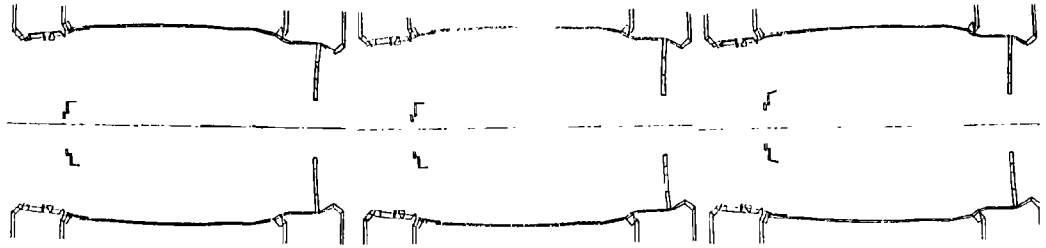
Fig 5 Stress distribution when support rings are of different materials

从以上两项实验可得出如下结论：支承环套材料应选用铸钛。

#### 5.5 次镜座形式的进一步探讨

以上各种分析比较仅限于三条轮辐的次镜座形式，目前国内外大多也都采用该形式。那么能否采用4条轮辐形式呢？采用后对次镜的影响又会怎样呢？为说明该问题本节又做了另一项计算机模拟计算。模型由镜筒、次镜座组成，采用两点约束，辅支承处 $U_Y=0$ 。结构形式分别为

图2所示三种形式。各形式下的变形剖面图如图6所示。



A. three spokes arranged radially B. three spokes tangent to central ring C. four spokes arranged radially

Fig 6 The section of deformed camera (Part) when secondary mirror's base is of different scheme

由图6可见, B 形式次镜座的平移和倾斜均小于 A 形式, 而 C 形式次镜座的倾斜及平移量均小于前两种形式。因此 C 形式从抗热变形的角度讲确是最优。但由于该结构拦光量稍大, 且涉及超定位问题, 采用时确有一定的问题需要探讨。

## 6 结 束 语

根据上述计算结果的分析比较, 得出如下几个结论:

- (1) 沿次镜座三条轮辐方向的3点约束方式优于关于光轴对称的2点约束方式。
- (2) 次镜座三条轮辐相切布置优于径向布置。
- (3) 辅助支承处沿光轴方向的自由度不应限制死, 但也不宜完全释放, 这就要求安装时适当的采用柔性结构。
- (4) 支承环套材料采用铸钛更佳。
- (5) 在不影响拦光的情况下, 可考虑采用四条轮辐形式的次镜座结构。

## 参 考 文 献

- [1] Jacob Miller. Predicting Performance of Optical Systems Undergoing Thermal/Mechanical Loadings Using Integrated Thermal/Structural/Optical Numerical Methods Proc. SPIE, 770: 303~ 311
- [2] Ansys-engineering Analysis System User's Manual Swanson Analysis System. Inc., 1987
- [3] 卢 镔 空间遥感相机结构的计算机辅助工程分析. 光学机械, 1989, (4): 16~ 23
- [4] 杨洪波 空间遥感相机镜筒主要参数工程分析与计算. 光学精密工程, 1994, 2(2): 23~ 28

## Investigation Scheme of the Space Remote-sensing Camera Structure by Thermoelastic Analysis

Lin Chunfu, Lu E and Wei Pichang

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

### Abstract

In order to obtain optimum scheme of the space remote-sensing camera structure it is necessary to investigate the concentricity in the optical system due to temperature alternative by means of thermoelastic analysis. Different schemes of the camera structures have been analysed and compared based on Computer-Aided Engineering Analysis. Displacements, deformations and stresses of the camera structure, due to the effects of temperature, have been calculated and the variation of the concentricity in the optical system is given. By several design-analysis iteration, the reasonable scheme of the camera have been obtained. The results are of important value for improving the camera design.

**Key words:** Space remote-sensing camera, CAE, Thermoelastic, Displacement

**林春福** 男, 1968年7月17日生。1991年7月毕业于浙江大学机械工程系机械设计及制造专业。现于中国科学院长春光机所机械制造专业攻读硕士学位。主要研究方向为计算机辅助工程分析(CAE)