

空间遥感相机结构的计算机辅助工程分析

卢 铿

摘要:为满足空间遥感相机苛刻的设计要求,有必要对其初步设计方案的光学及机械性能进行预估。为此,对空间遥感相机在温度场、重力场及随机激励载荷下的光学同心度及光程差的变化进行了研究。通过计算机辅助工程分析的手段,对遥感相机不同的结构方案进行了分析、比较。计算了相机结构在温度场及重力场作用下的位移与变形,进而求出光学同心度及光程差的变化。对随机激励谱下的动力学响应RMS也进行了估算。通过若干设计——分析迭代,选取了最佳方案并实现了结构优化。

一、前 言

空间遥感相机作为高精度空间摄影系统,不仅要求具有良好的光学性能,如分辨率、传递函数、同心度等,还要求在空中作业条件下具有良好的结构尺寸稳定性。为实现准确定位,保证像质,除要求可控扫描机构具有精确的定位精度外,还要求整个相机结构具有足够的抗干扰能力。对于来自外界的机械冲击、振动、温度场波动以及在失重状态下因重力释放所产生的周期的或随机的干扰,要有“我自巍然不动”的品质,亦即足够的结构稳定性。考虑到运载工具的承载能力及尺寸空间的限制,相机应设计为高比刚度装置(即 $\frac{k}{m}$ 要大, k ——结构刚度, m ——相机质量)。为实现上述要求,必须寻求一个合适的设计方案。为此,针对初步拟定的几种不同的相机结构方案,用有限单元法在计算机上进行了不同载荷工况下的模拟,对其光学及机械性能进行了预估,找出影响其性能的薄弱环节,达到优选方案、优化设计的目的。

二、工程分析目标

如何保证使用性能,这是设计考虑的出发点,也是工程分析的着眼点。

从使用性能来说,如何使相机光学部件同心度高,成像清晰是一核心问题。就结构而言,保证像质及同心度的关键在于相机结构尺寸的稳定性,亦即在不同工况下光学部件的位移与偏转以及整体结构的变形应在允差内。对相机进行结构工程分析的目的,就是要通过计算机模拟的手段,求出在各种工况下的位移响应,找出影响相机结构尺寸稳定性的薄弱环节,进而为选型及改进设计提供科学依据。

从相机的光学成像质量的角度出发,要求相机结构应满足如下技术指标:

1. 从前部校正镜到主镜间的光程变化不得超过0.7mm;
2. 主镜偏摆不得超过30";
3. 主镜沿矢径方向位移不得超过0.07mm。

从相机机械结构总体尺寸稳定性角度出发,相机结构应满足下列技术指标:

- (1) 相机结构的自振频率应分别大于80Hz (沿纵向) 及40Hz (沿横向);
- (2) 在随机载荷激励下相机的动态位移响应不得超 1 ~ 3 项所规定的指标。

三、分析计算内容

1. 自重载荷下结构变形, 进而求出从前部校正镜到主镜间光程变化及主镜偏转角度。预估相机在空间环境下因失重释放内能所产生的同心度变化。

2. 求出相机在空间工作环境下温度场的分布以及由此引起相机的热变形, 进而求出同心度的变化。

3. 相机结构的动态特性, 通过自振频率与振型分析, 找出影响整体结构动态刚度的薄弱环节。频谱响应分析, 通过频谱扫描模拟, 求出相机结构在随机振动作用下的位移响应, 进而检验相机在各振动谱段内动态同心度及光程差的变化量。

四、分析计算模型

由于受运载工具承载能力及内部容纳空间的限制, 相机结构型式及安装固定方式的选择余地不大。针对实际使用条件及功能要求, 初步拟定 4 种结构型式, 并由此建立相应的有限

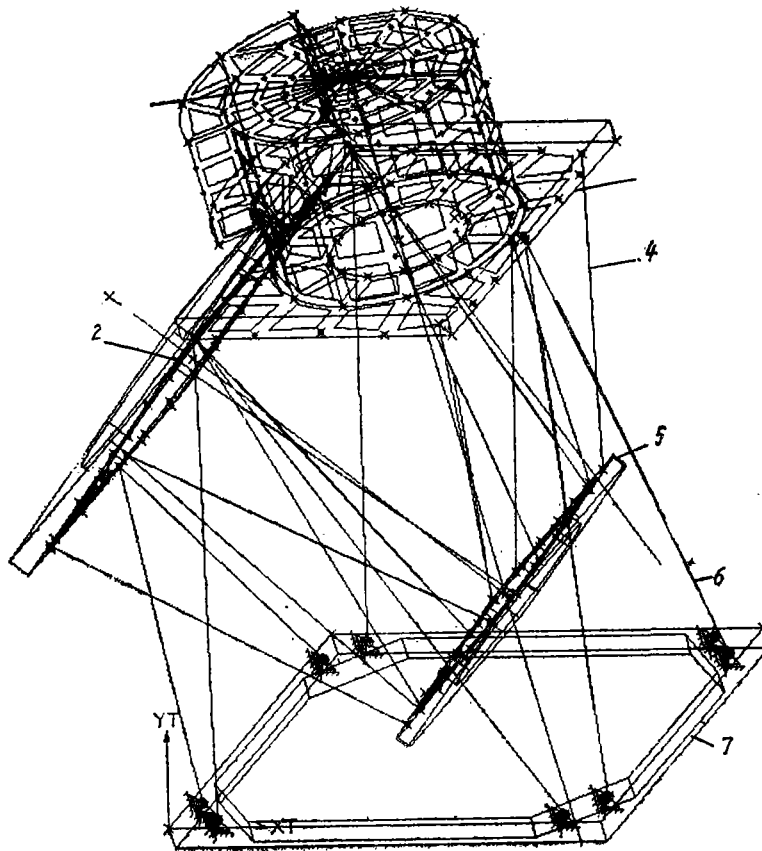


图 1 相机结构有限元模型

1—扫描机构; 2—主镜托板; 3—前校正镜支板; 4—内支杆; 5—反射镜托板; 6—外支杆; 7—平台

元力学分析模型。模型是按实际设计结构型式用有限单元法中相应的单元组装而成，其原始几何参数来自概念设计所产生的相机结构实体模型。由于工程分析与概念设计是在同一CAD工作站工程数据库环境下进行，因而使数据流传输高效、高精度。图1所示为相机结构有限元模型图。根据相机结构特点，模型分别采用梁单元与板壳单元组成。其中支撑光学系统的空间桁架结构采用3维空间梁单元组成。考虑到各梁单元间用柱销铰接，故用端点松弛的办法处理铰接活动自由度；相机的其余部分均采用板壳单元；各光学单元，例如主镜、前部校正镜等，作集中质量处理，通过连接点作用到相机结构上。本模型中，节点总数为190，单元总数为171，自由度总数为1036。相机与平台相连处采用全约束的边界条件。

图2所示为不同结构型式有限元力学模型示意图。其中图2-1到图2-3为卧式结构型式，图2-4为立式结构。不同的结构方案主要差别在于桁架布局及支撑点的不同。

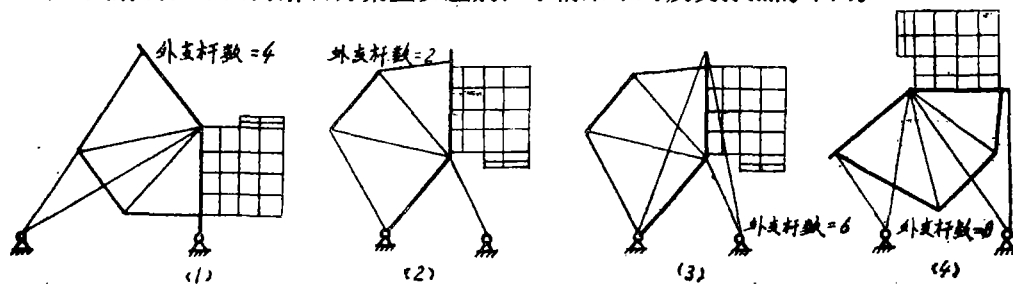


图2 不同结构方案模型示意图

模型中构件所采用的材料主要考虑比刚度要高，直接装配光学单元的构件热膨胀系数应尽可能与光学玻璃的接近。为保证光学系统支撑构件重量轻、刚度 high，采用了高比刚度的碳纤维材料作内外支杆。所用材料见表1。

表1 材料物理特性

代号	材 料	物理量	$E(10^8 \text{kg/cm}^2)$	μm	$\alpha(10^{-6})$	$\gamma \text{g/cm}^3$	用 途
21	钛 合 金		1.2	0.35	9	4.6	桁架接头铰链
22	铝 合 金		0.8	0.34	22	2.75	托板、遮光罩
23	钢 钢		1.5	0.25	7	8.3	固定镜头环
31	碳 纤 维		4		-0.8纵 22横	2	内外支杆

载荷处理的主要依据是参照法国 SPOT 相机所提技术条件以及我国有关技术条件 (DF1600.001J) 作参考。相机主要承受静载荷与动载荷，其中静载荷包括二种工况：工况1系自重载荷。主要考虑相机结构在地面装校时承受1g的地球引力作用，当相机在空间工作时，因重力的丧失而使在地面装校时因重力影响存贮在相机结构内部的内能释放出来，从而使相机结构发生变形；工况2系热载荷作用。它是指相机在空间工作状态受太阳辐射以及电子器件工作时发热等情况，所导致的相机结构温度分布不均匀并由此而产生热应力，进而使相机结构发生变形。由于给定的技术条件有限，初步估算按均匀温度场考虑，其均匀温度变化为 10° 。

动载荷主要表现为随机激励载荷。这些激励一方面来自安装平台，由运载工具在运行时通过平台随机地作用到相机结构上；另一方面，来自扫描伺服机构，主要表现为周期性干扰。由平台作用给相机结构的随机载荷，可由图3所示的冲击谱线给出。

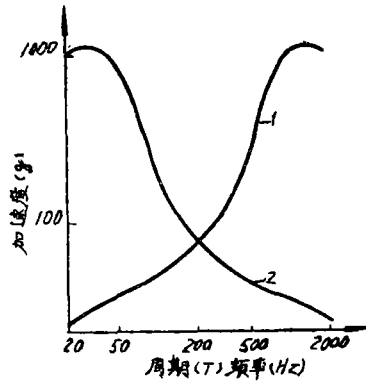


图3 冲击谱谱线图

1—加速度—频率， 2—加速度—周期

其中冲击为 50g，持续时间为 11 ± 1 ms，波形为半正弦，方向为沿运载工具纵向，振动按三个谱段作为谱分析的输入，即10~50 1mm (单峰), 50~300 10g, 200~2000 12g

五、结果与分析

根据分析目标及环境条件，用 SAPV 及 SAPVI 程序分别在 M160H 机及 Apollo CAD 工作站上进行了模拟计算，对所建各个模型得出计算结果如下：

表2 静力分析结果

项 目 \ 模 型		卧式 1	卧式 2	卧式 3	立 式	spot	技术要求
光程变化 ΔL (cm)	G	0.82×10^{-3}	1.17×10^{-3}	0.93×10^{-3}	1.08×10^{-3}		± 0.07
	ΔT	1.5×10^{-2}	0.29×10^{-2}	3.47×10^{-2}	22.4×10^{-2}		± 0.07
主镜偏摆 $\Delta \theta$ (秒)	G	3.14"	0.72"	2.10"	3.20"	30"	30"
	ΔT	55.83"	18.86"	88.50"	12.77"	41"	30"
主镜平移 ΔS (cm)	G	0.98×10^{-3}	0.98×10^{-3}	0.85×10^{-3}	1.89×10^{-3}		± 0.007
	ΔT	-2.1×10^{-2}	0.7×10^{-2}	1.47×10^{-2}	0.36×10^{-2}		± 0.007
重心高度 cm	相 对 平 台	70	65	61	79	100	
说 明	$\Delta L, \Delta \theta, \Delta S$ 值含义，请参看PAGF						

表3 动力分析结果

项 目 \ 模 型		卧式 1	卧式 2	卧式 3	立 式	spot	技术要求
自振频率 f_n (Hz)	f_{n1}	76.02	60.29	63.75	64.69	45.00 横 80.00 纵	
	f_{n2}	86.91	104.03	107.3	75.23		
	f_{n3}	96.70	112.81	119.8	77.37		
转动惯量 I kg.cms/rad	I_x	1.03×10^4	9.7×10^4	1.02×10^4	1.25×10^4		
	I_y	3.21×10^3	2.7×10^3	2.86×10^3	3.20×10^4		
	I_z	9.5×10^3	9.3×10^3	9.87×10^3	9.30×10^3		
说 明	f_n 振型图请参看图5~图8						

表4 谱分析结果

参 数 项	测 算 项			RMS
	一阶固有频率 下位移响应	二阶固有频率 下位移响应	三阶固有频率 下位移响应	
光程差($\times 10^{-3}$ cm)	25.189	0.0129	-19.450	3.15
主镜偏摆(秒)	8.726	0.016	16.975	17.380
主镜平移($\times 10^{-3}$ cm)	1.196	0.002948	13.60	13.66

为了更清楚地说明问题，将得到的计算结果以直方图形式对各种方案的变形加以比较。(见图4~7)。

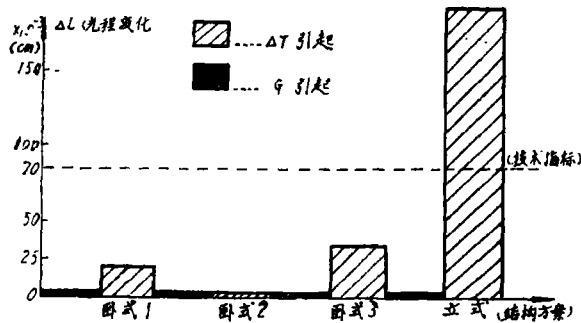


图4 由自重、温升引起光程变化比较图

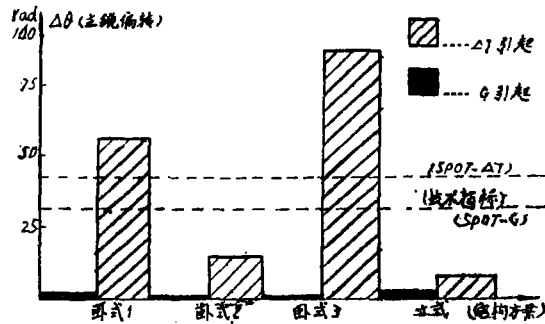


图5 由自重、温度引起主镜偏转比较

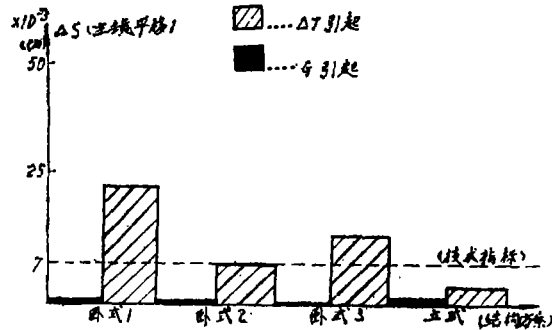


图6 由自重、温升引起主镜平移比较

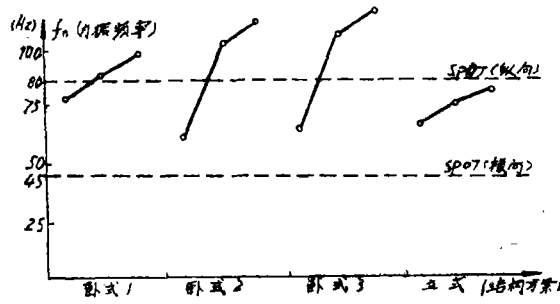


图8 自振频率分布比较图

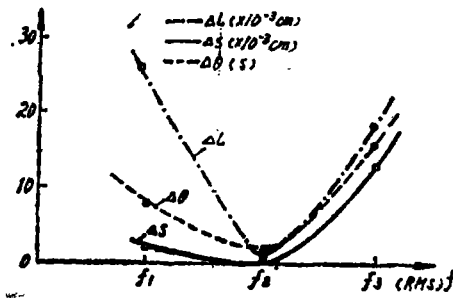


图9 谱分析响应曲线图

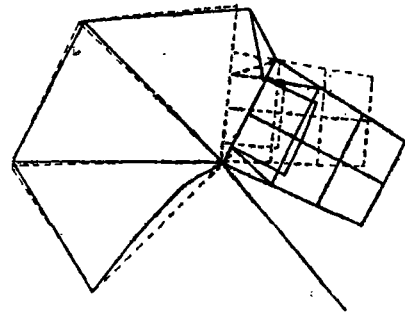


图10 卧式2 一阶振型图
 $f_1 = 60.29\text{Hz}$

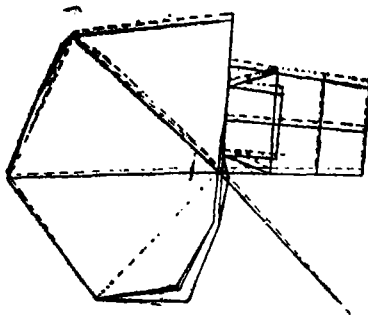


图11 卧式2 二阶振型图
 $f_2 = 104.03\text{Hz}$

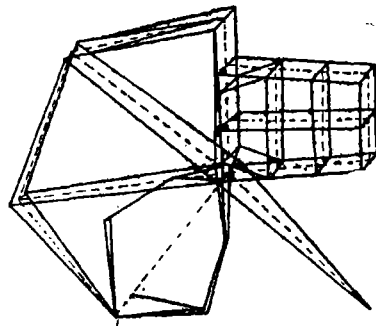


图12 卧式2 三阶振型图
 $f_3 = 112.81\text{Hz}$

通过对计算结果加以分析比较，可以得出如下结论：

1. 选择相机结构型式

由直方图不难看出，在静载荷工况下，无论是对相机光学系统的光程差也好，还是主镜的位移、偏转也好，卧式2的结构方案显然优于其它三种方案。这不仅体现在卧式2的性能指标均满足技术要求，而且其结构形式也较其它方案简单，便于装配和校准工艺操作。对动力学特性来说，尽管其一阶频率偏低，但前几阶频率点间距拉的较宽，各阶频率点连线的斜率较大，这对相机结构在瞬间通过共振点是非常有利的。（参看图8）针对一阶频率偏低，按着卧式2动力分析振型（见图10~12），对其前部校正镜支撑板及主镜托板进行增强，适当增加

其厚度及筋，则使一阶自振频率明显得到改善，即由原60.29Hz提高到87.74Hz；从谱分析结果看，卧式2的各谱段内的响应均满足技术要求（见图9）。基本上，相机的结构型式确定为卧式2。

2. 环境条件对相机性能的影响

(1) 由计算结果可见，在诸环境条件中温度场变化所带来的影响是一个不可忽视的因素。在太空环境下，这种影响主要通过辐射与传导作用在结构上。热辐射与传导不仅导致光敏接收器件的热噪声加大而且使整个相机结构发生变形，致使光学系统同心度变差。为消除或减小温度场变化对相机的影响，一方面要选择合适的结构型式，必要的导热、隔热及自动温控措施外，在结构材料的选取上应尽量选线胀系数 α 小的且彼此相接近的材料。

(2) 外界动态干扰是影响相机光学系统同心度的一个极为重要的因素。相机结构上各点的位移响应可由下式给出：

$$X(\Omega) = H(\Omega)F(\Omega) \quad (1)$$

式中 $X(\Omega)$ ——线性系统的位移响应

$H(\Omega)$ ——传递函数

$F(\Omega)$ ——输入荷载

Ω ——强迫频率

如若阻尼甚小的话，传递函数可由一组实正交模态表达：

$$X(\Omega) = \Phi_n H_n(\Omega) \Phi_n^{-1} F(\Omega) \quad (2)$$

式中： Φ_n ——在指定位置上模态输出；

Φ_n^{-1} ——外界扰动的模态参与因子。

H_n ——模态坐标下传递函数

而
$$H_{n_m}(\Omega) = (\omega_m^2 - \Omega^2 + i2\zeta_m \omega_m \Omega)^{-1} \quad (3)$$

其中 ω_m ——第 m 阶模态的固有频率

ζ_m ——第 m 阶模态的阻尼比

由(2)及(3)式可知，一旦外界强迫荷载频率与相机的固有频率接近，就会出现 $X(\Omega)$ 急剧增长的趋势，进而导致产生共振的危险。这种动态干扰给相机带来极为不利的影响。由于相机在动态干扰下产生颤动，会使光学系统的同心度精度丧失；也会使相机上有关光学元器件产生松动，导致装校后精度不可逆转地降低；更甚者会导致整个相机结构的破坏。因此，为保证相机光学系统在工作状态下对同心度及光程差精度的要求，必须限制相机结构在各载荷谱作用下的位移响应在额定指标内。为此，一方面可通过在相机与平台间增加适当的阻尼以衰减外界随机干扰，另一方面改善相机结构本身的动态特性。改善相机结构动态特性

表5 卧式2相机结构动态特性改善比较表

频率阶	项	修改前	改进后	敏感构件
f_1 (Hz)		60.29	87.74	前校正镜托板
f_2 (Hz)		104.03	117.77	主镜托板
f_3 (Hz)		112.81	162.99	主镜托板、承力梁

的关键在于提高相机整体的动态刚度。根据相机动态特性分析的振型图（见图10~12），很容易找到相机动态刚度的薄弱环节。针对振型图中的敏感构件进行改进，动态性能能获得明显改善，见表5。

(3) 由于在太空环境下重力释放引起的变形可以忽略不计，这可从直方图比较中明显地表现出来。（见图4~7）

六、结 束 语

实践证明，计算机辅助工程分析已成为空间遥感相机在选型与结构优化上的必不可少的有力工具。通过概念设计——工程分析的若干迭带过程，使设计趋于更加合理。在此基础上进行详细工程设计，进而加工组装成样机，将使产品质量大大提高，同时由于使设计少走弯路，因而研制周期将大大缩短。以上所作工作只是初步的，进一步优化设计及其有关的CAT（计算机辅助测试）工作还有待深入开展。

参 考 文 献

- [1] J.P.Midan, Earth-Orient. Applic. Space Technol., 6, No 2, p163—172, 1986
- [2] Allen.J.Bronwick, SPIE, 748, p68~80, 1987
- [3] R.P.Iwens, R.J.Benhabib, et. al., SPIE, p114—125, 748, 1987.

Computer-Aided Engineering Analysis of Space Remote-Sensing Camera Structure

Lu E

Abstract

In order to meet the tight design requirement of space remote-sensing camera it is necessary to investigate the complex variation of the concentricity and optical path difference in the optical system due to temperature, gravitation and random excitation. Different schemes of the camera structures have been analysed and compared by means of Computer-Aided Engineering Analyses. Displacements and deformations of the camera structure, due to the effects of temperature and gravitation, have been calculated separately and the variation of the concentricity and optical path difference in the optical system is given. The dynamic response RMS under random excitation spectrum is estimated. By several design-analysis iteration the optimum scheme and structure have been obtained.