

CAE 技术在空间相机光机结构设计中的应用

牛晓明

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 CAE 技术在空间相机光机结构设计中发挥着不可替代的作用,主要表现为在光学元件的轻量化设计、形状的优化设计、材料的优化选择,进行光学元件支撑结构的灵敏度分析、优化设计、轻量化设计,整机结构形式的优化选择及结构强度、刚度分析等方面对设计起着决定性的指导作用,是现代设计方法中最重要的手段之一。

关键词 CAE 空间相机 结构刚度

中图分类号 TP391.7, TB852.1 **文献标识码** A

1 引言

空间光学仪器作为一种高科技的精密仪器,从光机结构设计来说,不同于其它仪器的地方在于对结构的比刚度要求很高,即要求结构具有较高的刚度,同时重量要轻,这对设计者来说是一个严峻的课题,要完成这一任务,靠设计者的经验进行设计无法办到,采用实验的方法必然大大增加研制成本、延长研制周期,在日益激烈的市场竞争中是不可取的。利用计算机辅助工程分析技术(CAE),以构造相机的虚拟样机为基础,进行全方位深层次的仿真分析,使传统的设计手段发生了一场革命^[1],在产品的研制设计中显示了巨大的优越性。随着计算机硬件软件技术的飞速发展,进行大规模和超大规模有限元分析计算已经成为可能,这使得利用 CAE 技术对复杂结构的分析更加快速、准确,而且随着 CAE 技术的不断发展和工程需要,它的应用已经不仅仅局限于产品设计后期的简单校核,而是从一开始就渗透到设计中去并且贯穿于设计过程的始终,指导设计^[2],尤其对于空间光学仪器来说,为了确保相机不仅在空间环境状态下能正常工作,保持足够准确度,而且在发射运载过程中不破坏,不产生残余变形,要求相机结构具有足够的刚度和强度^[3];同时,相机在空间恶劣环境下应具有良好的尺寸稳定性^[4],以保证视轴(LOS)及镜面的变化(WFE)在许用范围之内。为此,在方案设计阶段针对相机结构进行工程分析,考核方案的可行性,并为选取合理设计参数提供科学的依据。工程分析在光机

收稿日期:1999-09-13

修稿日期:1999-10-08

结构设计中的内容主要包括光学元件的轻量化分析、光学系统支撑结构的优化设计、整机支撑结构形式的优化选择以及整机的工程分析等几个方面,本文围绕这几个方面,以某空间光学遥感器为例,论述了 CAE 技术在空间光学遥感器光机结构设计中的应用。整个分析的流程图如图 1 所示。

2 光学元件的轻量化设计及其支撑方式的确定

空间相机中的光学元件特别是主镜是整个光学系统中最重要部件,它的面形精度高低直接关系到整个相机成像质量的好坏。高分辨率空间相机的孔径大,焦距长,造成主镜的体积、重量较大,因此必须进行轻量化设计^[5],主镜轻量化设计主要采取背部打轻量化孔的方式,轻量化孔的形式有圆形孔、三角形孔、六边形孔以及扇形孔等,轻量化孔有封口和不封口两种方式。圆形轻量化孔可采取封口形式,三角形孔一般为不封口。主镜采用背部多点支撑形式,支撑方式的确定应以主镜在加工状态、工作状态的重力和温度场作用下的面形变化均满足精度要求为依据,本相机主镜为 600mm 口径、厚 85mm 的熔石英反射镜,支撑方式为背部支撑,初步选择如下几种主镜轻量化方案及支撑方式,分别建立有限元分析模型并进行分析计算,模型图如图 2 所示。

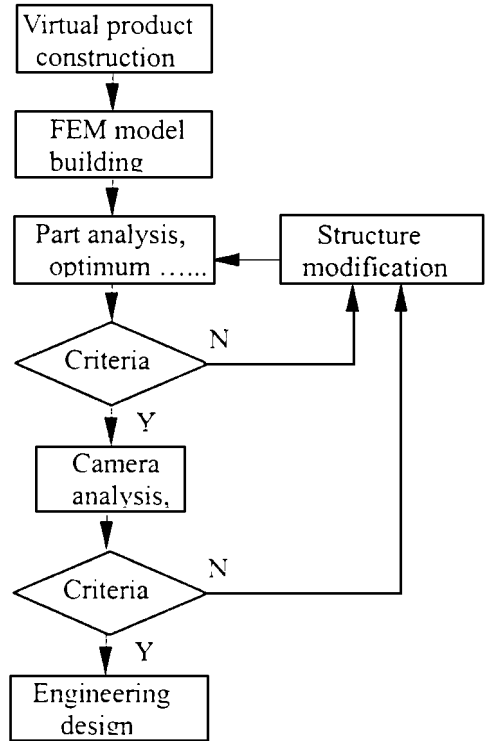
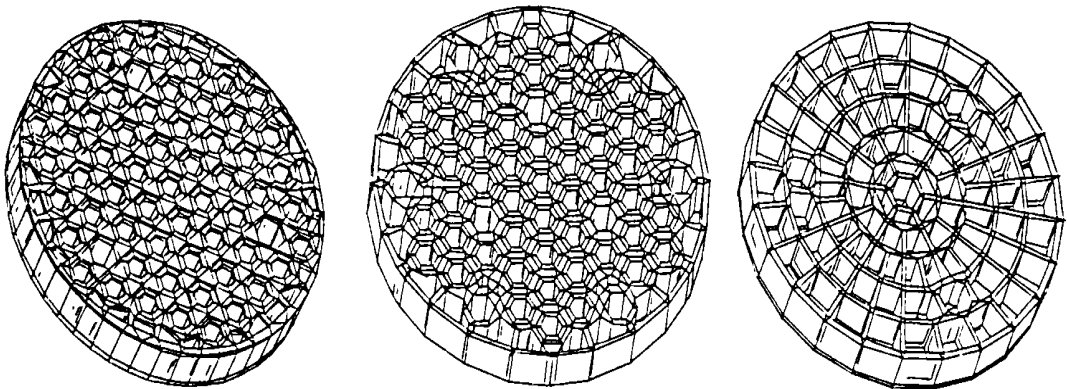


Fig. 1 Scheme of CAE in design of camera



(a) circular hole
3 supports

(b) circular hole
9 supports

(c) sectrial hole
3 supports

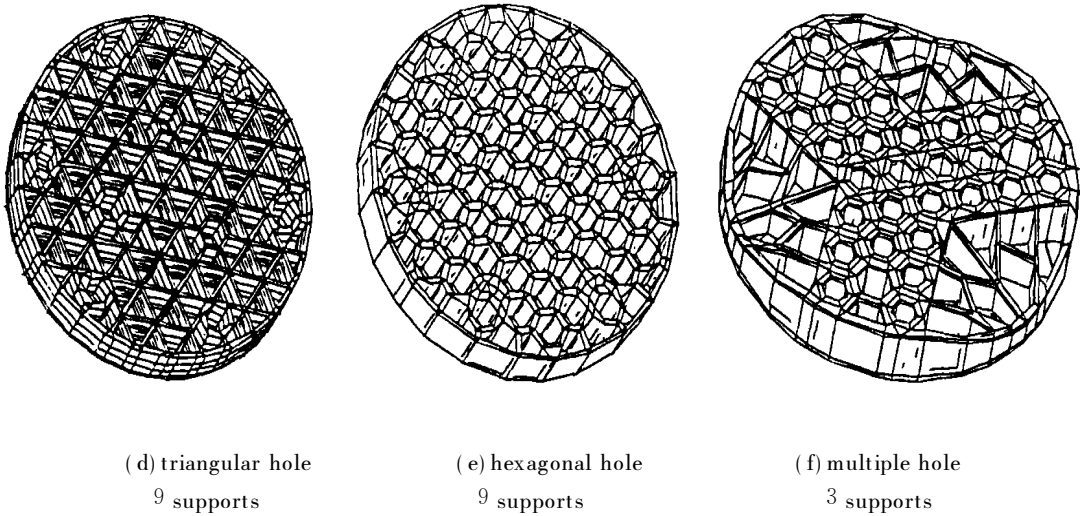


Fig. 2 Scheme of lightweight primary mirror and its support pattern

- 2.1 方案 1:主镜采用圆形半封闭轻量化孔,支撑方式为三点支撑,见图 2(a)。
- 2.2 方案 2:主镜采用圆形半封闭轻量化孔,支撑方式为九点支撑见图 2(b)。
- 2.3 方案 3:主镜采用扇形轻量化孔,支撑方式为三点支撑见图 2(c)。
- 2.4 方案 4:主镜采用三角形轻量化孔,支撑方式为九点支撑见图 2(d)。
- 2.5 方案 5:主镜采用六边形轻量化孔,支撑方式为九点支撑见图 2(e)。
- 2.6 方案 6:主镜采用多样的轻量化孔,支撑方式为三点支撑见图 2(f)。

Table 1 surface figure error of primary mirror

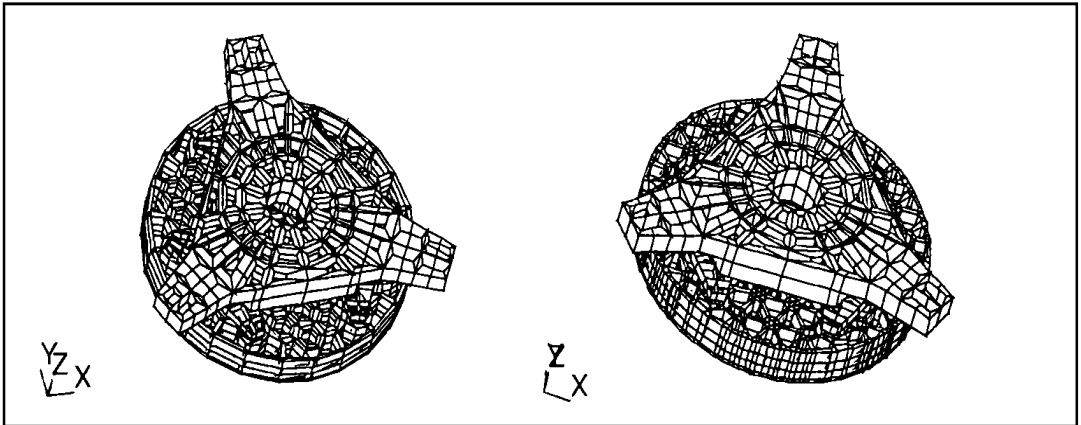
case	Shape of lightweight hole	Number of supports	Horizontal optical axis		Vertical optical axis	
			PV (nm)	RMS (nm)	PV (nm)	RMS (nm)
1	Circular	3	19.5	4.3	106.5	25.8
2	Circular	9	5.1	1.1	25	4.1
3	Sectrial	3	19.4	4.3	105.9	25.2
4	Triangular	9	4.8	1.0	24.6	3.9
5	Hexagonal	9	6.7	1.4	34.2	8.6
6	Multiple	3	20.4	4.8	111.2	24.4

经过分析计算得到结果见表 1。

主镜的精度要求为: $PV = 66\text{nm}$, $RMS = 14\text{nm}$ 。由表 1 可以看出,主镜采用三点支撑难以满足要求,采用九点支撑方式时主镜采取三角形轻量化孔和圆形轻量化孔均能满足要求,由于三角形轻量化孔加工工艺性较好,因此选用三角形轻量化孔九点支撑方式。

3 主镜支撑结构的优化设计

主镜支撑结构是相机整个结构中最重要的一部分,支撑结构设计的合理与否,直接关系到主镜在各种载荷作用下的面形精度的好坏,由于主镜与支撑结构材料不同,存在线胀系数的匹配问题,因此主镜与其支撑结构的连接部件在结构设计、材料的选择等方面要满足多方面的要求,为了保证主镜在温度场变化环境下的热变形尽量均匀,除要求支撑结构的材料选择尽量与主镜匹配外,还要求连接结构具有一定的柔性,以防止支撑结构的热变形直接传递到主镜上,因此主镜采取柔性支撑连接过渡结构,柔性支撑结构的材料选择在线胀系数上与主镜材料线胀系数近似的材料,使主镜具有较好的热稳定性。此外,为了保证主镜在重力释放等条件下仍具有较好的面形精度,要求支撑结构整体具有一定的刚度,为此设计了两种不同形式的支撑结构,其有限元模型图如图 3 所示,(a) 为圆形轻量化孔主镜及其支撑结构,(b) 为三角形轻量化孔主镜及其支撑结构。表 2 为计算结果。



(a) circular hole primary mirror

(b) triangular hole primary mirror

Fig. 3 Primary mirror and its support structure

Table 2 surface figure error of primary mirror

case	light weight hole	support pattern	Horizontal optical axis		Vertical optical axis	
			PV (nm)	RMS (nm)	PV (nm)	RMS (nm)
1	Circular	9 point	70.5	14.2	150.3	37.3
2	triangular	9 point	31	7.1	55.6	12.4

由表 2 可以看出,第二种设计方案大大优于第一种方案,因此采用第二种方案。

4 相机桁架支撑形式的优化选择

为了减轻相机的重量,相机采取前后框架,中间有桁架杆连接的结构形式,前后框架为镂空的刚架形式,前后框架由 8 根桁架杆相连,这种结构虽然重量较轻,但整体刚度受到一定影响,导致结构的自振频率偏低,因此合理调整桁架杆的数量、连接位置和分布形式对提高整个相机结构的自振频率、减小结构变形具有非常大的影响,图 4 为三种不同支撑形式的桁架连接方案,计算结果见表 3。

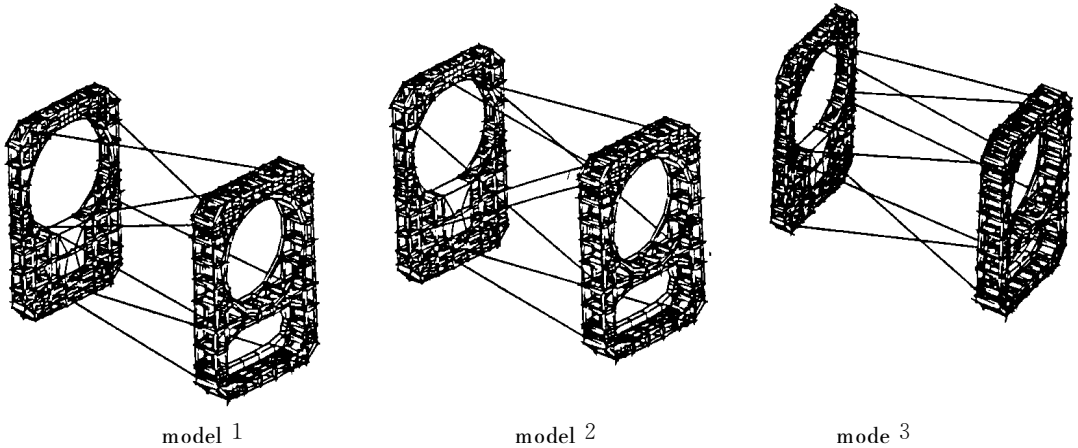


Fig. 4 Preliminary truss structure of camera

Table 3 Displacement and frequency of truss structure

Model	Maxim deformation(mm)	First modal frequency(Hz)
1	0.002	79.6
2	0.0025	94.6
3	0.0017	131.5

由表 3 可以看出,第三种桁架结构形式设计较为合理,动态刚度最高。

5 整机的工程分析

经过以上各部分的分析计算,相机各组件已经满足加工和工作状态下的设计指标要求,下一步应考核整机装配后的静力学、动力学和温度特性,发现相机在整体结构上的薄弱环节进行改进,主要从强度和刚度两个方面对相机进行分析,一方面通过模拟相机结构在发射过程中所受各种冲击、过载等环境条件对结构的强度进行考核,以保证相机在发射过程中不破坏,发射后不产生残余变形;另一方面通过模拟重力释放、均匀和非均匀温度场的作用考察相机在空间工作状态下静态刚度能否满足要求,整个相机装配后的有限元模型如图 5 所示。经过反复计

算,优化选择,最后完成对相机的整体分析,相机在重力释放情况下的变形图如图 6 所示,整机计算结果如表 4 所示。

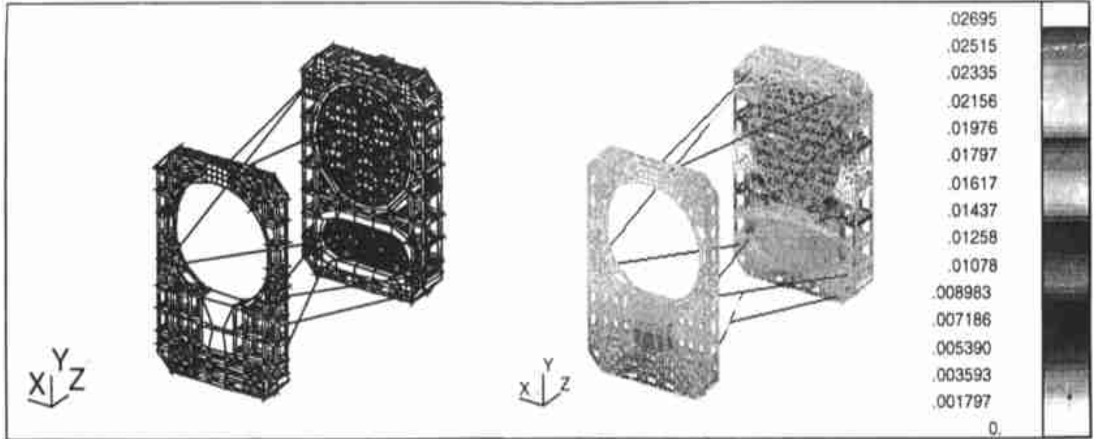


Fig. 5 FEM model of camera

Fig. 6 Displacement of camera

Table 4 Surface figure error of primary mirror and frequency of camera

item	Gravity release		2℃ temperature rising	Modal frequencies
	Horizontal optical axis	Vertical optical axis		
PV (nm)	45.2	43.1	46.3	65Hz (first mode)
RMS (nm)	9.1	8.4	9.6	90Hz (second mode)

由表 4 可见,整个相机在各工况下主镜技术指标均满足要求,且整机具有较高自振频率,表明整个相机具有较高动态刚度,进一步分析表明,相机在冲击、过载等机械载荷作用下结构应力小于许用应力,说明相机结构强度满足要求。

6 结 束 语

本文利用 CAD/CAE 技术,对空间相机进行了多方面的工程分析,许多结果是在无数次分析计算后得出的,通过计算解决了主镜轻量化设计方案、主镜支撑结构的形式、相机结构的支撑形式等关键问题,至此可以看出 CAE 技术在光学仪器光机结构设计中发挥的显著作用,本文所述也仅仅是 CAE 技术在空间相机设计中许多应用的一个方面,此外在相机的热分析、热控制、力学和热环境实验^{[6][7]}等方面都具有重要的作用,随着 CAE 技术应用的不断深入,如何更好地发挥它对设计的指导作用,提高效率,提高计算精度等方面还有待于进一步的研究和探讨,随着 CAE 技术的完善和发展,它一定会在工程领域发挥更大的作用。

参 考 文 献

- 1 卢镔. CAD —— 一场设计的革命. 光学 精密工程, 1994, 2(2) : 1~7
- 2 卢镔. 产品研制开发 CAD/CAE/CAM 技术路线与应用. 光学 精密工程, 1997, 5(6) : 1~9
- 3 牛晓明. 空间光学仪器结构件的动态特性分析及优化. 光学 精密工程, 1995, 3(6) : 99~106
- 4 牛晓明. 空间光学系统的热分析. 光学 精密工程, 1996, 4(6) : 54~60
- 5 吴清文. 空间相机中主镜的轻量化技术及其应用. 光学 精密工程, 1997, 5(6) : 69~80
- 6 卢镔. 基于 CAD/CAE/CAT 技术的空间遥感相机热设计研究. 光学 精密工程, 1998, 6(6) : 21~32
- 7 牛晓明. 空间光学遥感器的热响应分析及热控. 光学 精密工程, 1998, 6(6) : 74~78

Application of CAE in the Design of Optical and Mechanical Structure for Space camera

NIU Xiao-Ming

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

Abstract

The application of CAE technology plays an important and indispensable role in the design of space camera, mainly focus on the design of lightweight primary mirror, the optimum design of primary mirror's support structure as well as camera structure and in the strength and stiffness analysis of the structure. It is one of the most important means in modern design method.

Key Words: CAE, Space camera, Structural stiffness

牛晓明 男, 1968 年生, 1990 年毕业于北京理工大学, 获学士学位; 1995 年毕业于长春光机所研究生部, 获硕士学位; 现于长春光机所 CAD 应用技术研究室在职攻读博士学位。主要从事光学仪器的 CAD/CAE, 线性和非线性有限元分析, 热分析, 热设计。