0254-6124/2008/28(3)-260-04 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zhang Lei, Jin Guang. Structure design and modes analysis for the truss of light high resolution space Camera. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(3): 260~263

轻型空间相机桁架结构设计与模态分析*

张 雷[1,2] 金 光[1]

[1](中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

[2](中国科学院研究生院)

摘 要 为设计适合轻型高分辨空间相机的桁架结构，研究了模态分析的方法和桁架设计中需要考虑的问题. 通过对不同的次镜支撑结构进行模态分析和对比，提出了适用于轻型相机的三翼中心三角次镜支撑结构，并完成了整体桁架结构的设计. 有限元分析结果表明，所设计的桁架结构具有固有频率高、质量轻等优点，能够满足轻型空间相机的要求，并可以作为其他大口径空间相机桁架结构的设计参考.

关键词 轻型高分辨空间相机；桁架；支撑结构；模态分析

中图法分类号 V524

Structure Design and Modes Analysis for the Truss of Light High Resolution Space Camera

ZHANG Lei[1,2] JIN Guang[1]

[1](*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033)

[2](*Graduate School of Chinese Academy of Sciences*)

Abstract To design the light precision truss, which is fitted to characteristic of the light high resolution space camera, the method of mode analysis and the principles of designing the main truss are studied. The natural frequency and the first two vibration modes of different types supporting structure for the second mirror are analyzed using FEA software UG and Nastran . Then, a three vanes with triangular hub structure for supporting secondary mirror is proposed, and the design of the main truss is done. The analysis results indicate that the truss design has a higher resonance frequency and a light mass. So it can be applied to the light high resolution space telescope and it can also be a special reference to the design of other large aperture space telescope.

Key words Light high resolution space camera, Truss, Supporting structure, Mode analysis

1 引言

随着空间观测对光学成像的分辨率要求越来越高，空间光学系统的主反射镜口径将越来越大，焦距越来越长，这就对光学系统主次镜的安装、固定等提出了更高的要求. 桁架结构以其质量轻、结构简单、易于加工等优点，在空间大口径光学系统中得到广泛应用，如 Hubble 望远镜和 SPOT5 卫星上高分辨相机都采用了桁架结构.

轻型空间相机的桁架结构主要由主桁架和次镜

2007-11-03 收到原稿， 2008-01-20 收到修定稿

支撑结构等组成. 一般高分辨相机通光口径直径达到 600 mm 以上，次镜直径达到 100 mm, 桁架支撑结构的轴向最大尺寸至少将达 700 mm 以上，这给轻型高分辨空间相机的设计带来了很大的挑战. 利用模态分析的方法可以及时发现结构刚度的不足之处，不但可以缩短设计和加工周期，同时也降低了风险和成本. 因此，借助结构分析和模态的计算等技术，设计并选择具有更高的结构稳定性和谐振频率, 更小的遮光面积, 结构简单、易于制造和装配等优点的桁架结构，对轻型高分辨空间相机的总体方案设计是十分有意义的. 本文以卡塞格林系统为研究对象, 其主镜直径为 650 mm, 次镜直径为 140 mm, 主次镜之间的光学间距为 751.5 mm.

2 模态分析方法

由弹性力学有限元法，任何结构系统的运动, 均可以表示为内力、外力和惯性力的平衡方程组:

$$[\boldsymbol{M}]\{\ddot{\boldsymbol{u}}\}+[\boldsymbol{C}]\{\dot{\boldsymbol{u}}\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{u}\}=\{\boldsymbol{P}(t)\}+\{\boldsymbol{N}\}+\{\boldsymbol{Q}\}, \tag{1}$$

其中， $[\boldsymbol{M}]$, $[\boldsymbol{C}]$, $[\boldsymbol{K}]$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵； $\{\boldsymbol{P}(t)\}$ 为外力函数矢量； $\{\ddot{\boldsymbol{u}}\}$, $\{\dot{\boldsymbol{u}}\}$, $\{\boldsymbol{u}\}$ 分别为加速度矢量、速度矢量和位移矢量; $\{\boldsymbol{N}\}$ 为与 $\{\dot{\boldsymbol{u}}\}$ 和 $\boldsymbol{u}\}$ 相关的非线性外力项矢量； $\{\boldsymbol{Q}\}$ 为边界约束反力矢量. 在式 (1) 的阻尼和外载荷均为 0 时，即可推出系统的无阻尼自由振动方程:

$$[\boldsymbol{M}]\{\ddot{\boldsymbol{u}}\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{u}\}=\{0\}. \tag{2}$$

其对应特征值方程为

$$[\boldsymbol{K}-\omega_n^2\boldsymbol{M}]\{\phi\}=\{0\}. \tag{3}$$

式中， ω_n 为简谐运动角频率， $\{\phi\}$ 为位移矢量的幅值. 这时的系统一般存在着 n 个固有频率和 n 个主振型，每一对频率和振型代表一个单自由度系统的自由振动，这种在自由振动时结构所具有的基本振动特性称为结构的模态.

模态分析用于确定设计中的结构或部件的振动特性，即固有频率和振型. 结构系统的动力学响应都可用固有模态进行组合. 利用 UG 软件建立结构模型，并利用其高级仿真模块对模型进行离散化处理，再导入 Nastran 软件中进行求解可以完成结构的模态分析计算.

3 桁架结构设计与分析

3.1 桁架结构设计需要考虑的问题

结构设计中首先是考虑选择材料，经过对比分析各种结构材料的加工性能及比刚度等，最终选取碳纤维复合材料作为桁架的主要材料，TC4 作为连接部位和接头的首选材料. 两种材料在航天产品中已多次使用，具有以下突出的优点：工艺成熟、质量稳定、比强度高、密度和膨胀系数小、能在空间环境中正常使用等. 并且 TC4 能弥补碳纤维复合材料机械切削加工工艺性差的缺点，与碳纤维复合材料桁架有很好的兼容性，避免产生电化学腐蚀. 两种材料的基本属性如表 1 所示.

桁架结构作为相机的重要承力部件之一，在设计时要满足以下要求.

(1) 提供满足安装精度要求的机械接口.

(2) 足够的刚度和强度, 以适应静力环境和动力环境.

(3) 结构动态特性要好, 谐振频率要高, 减小外界振源对光学系统的影响.

(4) 结构热稳定性要好.

(5) 质量要轻.

次镜支撑结构除了要满足以上要求外，还必须对其尺寸进行严格控制，以减小光学系统的中心遮拦.

3.2 次镜支撑结构形式对比与分析

传统的次镜支撑结构设计上主要采用四翼辐形或三翼辐形支撑结构等形式, 如图 1 所示. Hubble 望远镜和以色列的地球资源观测卫星上的轻型相机 EROS-A 等采用了四翼辐形支撑结构，我国设计的空间太阳望远镜 (SST) 上的主要光学载荷 1 m 口径光学系统采用了三翼辐形支撑结构. 这两种结构具有结构稳定、中心遮拦小、易于加工和装配等优点. 但这两种结构形式的抗扭转刚度很小，当相机的口径增大时，为了保证同样的谐振频率，翼梁片的厚度增长速度很快，这对于中心遮拦十分不利. 为改善结构抗扭转强度差的缺点，有文献提出采用鼓型偏置式中心环支撑结构，但鼓型偏置式结构安装相对复杂，不易保证精度.

表 1 钛合金和碳纤维复合材料的主要属性

Table 1 Property of titanium and carbon-fibre

材料名称	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	屈服应力/MPa	线胀系数/K
钛	4.43×10^3	110	482	8.8×10^{-6}
碳纤	1.56×10^3	140	138	可设计

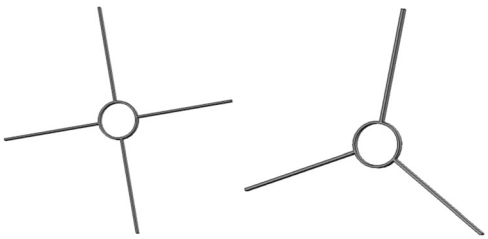

图 1 四翼辐形和三翼辐形支撑结构

Fig.1 Four vane radial support and radial spider vane support

针对以上问题, 新的设计采用三翼中心三角支撑的结构形式 (见图 2). 这种结构中心次镜的连接部位为结构稳定的三角形, 三翼为工字梁, 有利于提高固有频率和扭转刚度, 并且结构简单、易于加工和装配.



图 2 三翼中心三角支撑结构

Fig.2 Three vanes with triangular hub support

在 UG 环境下, 初步设计了相机的三种支撑结构. 利用 UG 高级仿真模块和 Nastran 求解器, 对以上三种结构形式进行初步模态分析, 其初始参数、边界条件和分析结果如表 2 所示. 由表 2 可知三翼中心三角支撑结构固有频率有显著的优势, 并且有次镜部位变形小、质量轻等优点.

3.3 整体桁架结构设计与模态分析

在整体桁架的设计过程中要充分利用三角形高稳定性的特点, 把框架和支杆组成结构稳定的三角形来支撑光学系统. 在这种情况下支杆能够很好地承受拉压负载, 能够很好地把前后框架及承载的各组件所造成的静态或动态弯曲力矩转化为支杆上的拉压负载, 可以大大提高整体的组合刚度. 根据以上对次镜支撑结构的分析和桁架设计需要考虑的问题, 设计的轻型高分辨相机的整体桁架结构如 图 3 所示. 主桁架、承力环、次镜支撑工字梁均采用碳纤维复合材料, 连接部位预埋 TC4 埋块, 其中主桁架和承力环为中空结构.

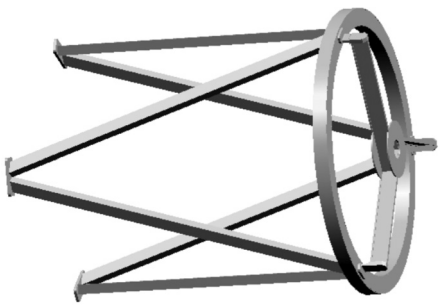

图 3 整体桁架结构

Fig.3 Whole truss structure

在合理简化小倒角、小圆角等基础上, 利用 UG 高级仿真模块建立有限元模型. 利用求解器 NASTRAN 软件对桁架结构进行模态计算, 分析结果如图 4 所示. 由图 4 可知, 该结构能够满足设计要求, 并且有很大的刚度裕度, 还有减轻质量的可能. 其 1 阶模态最薄弱环节为次镜承力环和次镜座部位, 加强这两个部位, 还可以大大提高整体桁架结构谐振频率.

3.4 有限元计算结果误差分析

在利用有限元软件对桁架结构进行分析计算过程中, 单元的类型和大小、对约束的处理、材料属性和连接环节的简化等对计算结果的精度都有一定的影响. 其中包括: ①把桁架接头一端全约束, 使计算结果偏高; ②材料的非线性在属性设置时的简化将给计算结果带来一定误差; ③各连接处存在接

表 2 次镜支撑结构分析的初始参数、边界条件和分析结果

Table 2 Original parameter, boundary condition and analysis results of supporting structure for the secondary mirror

结构形式	材料	单翼宽度 (总遮拦)/mm	组件质量 /kg	边界条件	分析结果 /Hz
四翼辐形		4.5/(18)	0.455	固定各	1 阶 224
三翼辐形	碳纤维	6/(18)	0.455	翼外侧	1 阶 294
三翼中心三角		6/(18)	0.413	节点	1 阶 431

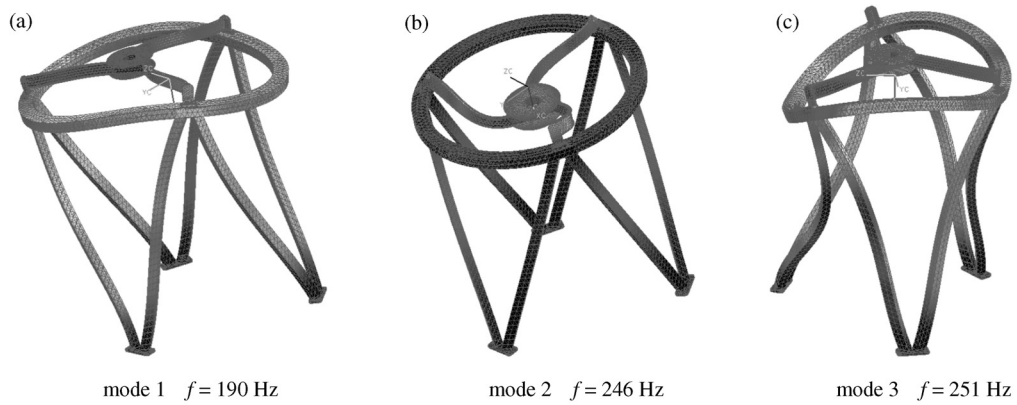

图 4 整体桁架结构的前 3 阶模态

Fig.4 First three modes of the whole structure

触非线性，以节点直接相连的方法处理使计算结果偏高；④以牺牲计算时间为代价，在关键部位采用密集的实体单元，使计算结果的误差减小. 通过以上分析可知，计算结果稍有偏大.

4 结论

通过多种结构形式对比，可以看出新设计的三翼中心三角的次镜支撑结构有效地提高了扭转刚度和轴向刚度，有利于减轻系统的重量，并减小光学系统的中心遮拦. 设计出的桁架结构能够满足轻型高分辨相机的要求，通过分析可以看出该桁架结构有很大的刚度裕度，还可以进一步优化设计以减轻质量. 本文的分析内容和结构形式也可以作为其他大口径空间相机结构设计的参考.

参考文献

[1] Chen Rongli, Fan Xuewu. Light weightening technology for high resolution TDICCD camera. *Spacec. Recov. Remote Sensing.*, 2003, **24**(02):20~24. in Chinese (陈荣利, 樊学武. 高分辨率 TDICCD 相机轻量化技术. 航天返回与遥感, 2003, **24**(02):20~24)

[2] Chen Rongli, Zhang Yukang *et al.* Design of bracket structure for the second mirror of space high resolution CCD, Camera. *Acta Phot. Sinica.*, 2004, **33**(10):1251~1254. in Chinese (陈荣利, 张禹康等. 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)

[3] Chen Zhiping, Chen Zhiyuan, Yang Shimo. Modal analysis and experiment on the main truss of space solar telescope. *Opto-Ele. Eng.*, 2004, **31**(12):1~3. in Chinese (陈志平, 陈志远, 杨世模. 空间太阳望远镜主桁架的模态分析与试验. 光电工程, 2004, **31**(12):1~3)

[4] Zhang Linbo, Ren Ge, Chen Hongbin. Dynamic analysis for supporting structure of crossed-plate type. *Opt. Prec. Eng.*, 2003, **11**(5):472~476. in Chinese (张林波, 任戈, 陈洪斌. 四翼十字形中心支撑结构的动力学分析. 光学精密工程, 2003, **11**(5):472~476)

[5] Yang Jinsong. Model correlation analysis of frame structure of a space camera. *Comp. Simul.*, 2006, **23**(1):274~276. in Chinese (杨劲松. 空间相机桁架模态相关性分析. 计算机仿真, 2006, **23**(1):274~276)