

文章编号: 1672-8785(2014)10-0023-04

# 空间相机碳纤维承载舱的动态设计

袁 涛

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘 要:** 为了满足空间相机在装星时的空间位置要求, 并避免空间相机与星体之间的共振, 设计了空间相机的承载舱。该设计采用了具有优良力学与工艺性能的碳纤维材料以及具有合理拓扑形式的桁架结构。采用计算机仿真试验和三次样条插值法对承载舱的杆截面尺寸进行了优化。结果表明, 当杆截面尺寸为  $28\text{ mm}\times 28\text{ mm}\times 3\text{ mm}$  时, 承载舱的动态特性和整体质量满足设计要求。

**关键词:** 碳纤维; 承载舱; 空间相机; 动态设计

**中图分类号:** TB332; TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.10.005

## Dynamic Design of Carbon Fiber Cabin Structure of Space Camera

YUAN Tao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** To satisfy the space position requirement of a space camera to be installed onboard a satellite and avoid the sympathetic vibration between the space camera and the satellite, a cabin structure is designed. The design uses a carbon fiber with good mechanical and technological properties and a truss structure with a reasonable topological structure form. The section sizes of the pole in the cabin structure are optimized by using a computer simulation test method and a cubic spline interpolation. The result shows that both the dynamic features and the total mass of the cabin structure satisfy the design requirements for the section size of  $28\text{ mm}\times 28\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ .

**Key words:** carbon fiber; cabin structure; space camera; dynamic design

## 0 引言

碳纤维复合材料具有比强度和比刚度高、可设计性及可成型性强等优异特性, 已在国内外航空航天结构上具有较多应用<sup>[1-2]</sup>, 比如机翼、整流罩和舱体等航空航天结构壳体。其次, 碳纤维复合材料具有较好的成型工艺性<sup>[3]</sup>, 因此非常适合光学系统使用。由于具有刚度大、抗

振能力强以及结构简单等优点, 桁架结构已成功应用于各种航天产品, 比如空间遥感器的支承结构<sup>[4]</sup>和框架结构<sup>[5]</sup>等。通过合理设计桁架结构, 并有效分配其承载能力, 可以获得优良的结构刚度和强度、良好的结构动态特性以及较轻的质量。模态分析能够确定结构系统的振动特性, 包括固有频率和振型。因此, 模态分析方法

收稿日期: 2014-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60538020)

作者简介: 袁涛 (1980-), 男, 安徽阜阳人, 副研究员, 主要从事空间光学遥感器的结构设计和动力学减振研究。

E-mail: ytcy426@sohu.com

在动态特性分析和设计研究中可起到基础性作用,已在航空航天领域得到了广泛应用<sup>[6-7]</sup>。另外,模态分析还可以作为其他动力学分析的起点,比如谐响应分析和谱分析。本文综合利用碳纤维复合材料和桁架结构的优点,为空间相机承载舱设计了一种满足复杂边界条件和设计空间约束的碳纤维桁架结构,并对其动态特性进行了分析。

## 1 理论背景

为了获得空间相机和承载舱结构系统的动态特性,我们将其当作无阻尼系统进行处理。其振动方程为<sup>[8]</sup>

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{u}\} + [\mathbf{K}]\{u\} = \{0\} \quad (1)$$

式中,  $[\mathbf{M}]$  为质量矩阵;  $[\mathbf{K}]$  为刚度矩阵;  $\{u\}$  为节点的位移向量;  $\{\ddot{u}\}$  为节点的加速度向量。节点的位移向量为

$$\{u_m\} = \{\phi_m\} \cos \omega_m t \quad (2)$$

式中,  $\{u_m\}$  为第  $m$  阶振型的位移向量;  $\{\phi_m\}$  为第  $m$  阶振型的特征向量;  $\omega_m$  为第  $m$  阶圆频率 (rad/s)。

为了获得系统的模态频率和模态振型,将微分方程组的求解转换成特征值问题:

$$([\mathbf{K}] - \omega^2[\mathbf{M}])\{\phi\} = \{0\} \quad (3)$$

式中,  $\{\phi\}$  为特征向量;  $\omega$  为圆频率 (rad/s)。

通过式 (4) 可得系统的  $n$  阶模态频率  $\omega_m$  ( $m=1,2,\dots,n$ ), 其中  $n$  为系统的自由度。

$$|[\mathbf{K}] - \omega^2[\mathbf{M}]| = 0 \quad (4)$$

将模态频率  $\omega_m$  分别代入式 (3), 可得特征值问题:

$$([\mathbf{K}] - \omega_m^2[\mathbf{M}])\{\phi_m\} = \{0\} \quad (5)$$

由式 (5) 可求得非零解向量, 即对应模态频率  $\omega_m$  的模态振型:

$$\{\phi_m\} = \{\phi_m^1 \phi_m^2 \dots \phi_m^n\}^T \quad (m=1,2,\dots,n) \quad (6)$$

## 2 承载舱设计

承载舱放置在卫星平台上, 其底面与卫星平台连接。因此, 在承载舱的底面桁架设计中, 需要充分利用卫星平台的平面空间, 同时还要考虑卫星平台的蜂窝板结构在刚度较高方向上所提供的支撑刚度。

承载舱的上平面用于支撑并连接空间相机。因此, 在承载舱上平面桁架的设计中, 要为空间相机的底部支撑结构提供连接点以及足够的支撑刚度。该连接点在设计上就成为了桁架杆的交汇点。

此外, 承载舱的两侧没有辅助支撑结构, 因此需要巧妙地利用空间桁架杆在笛卡尔坐标系中所提供的刚度分量, 形成各方向上的结构刚度。

根据实际使用要求, 承载舱需要设计内部空间。因此, 承载舱的设计空间就限制在需要预留的内部空间与整流罩之间。同时, 在设计时还要防止承载舱与星敏感器、太阳翼等形成物理干涉。

在动态特性方面, 为了避免空间相机与卫星平台发生共振, 由承载舱和空间相机组成的结构系统在 Y、Z 方向上的一阶模态频率要大于 40 Hz, 在 X 方向上的一阶模态频率要大于 150 Hz。在质量分配上, 承载舱的整体质量要满足 20 kg 的指标要求。

综合考虑以上分析, 满足边界条件和设计空间约束的承载舱的拓扑结构形式见图 1。图 2 所示为碳纤维杆的截面形式和尺寸。

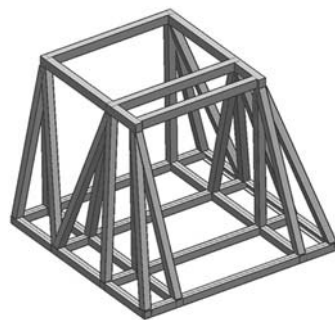


图 1 承载舱结构

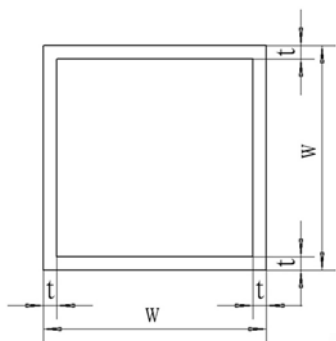


图 2 碳纤维杆的截面形式和尺寸

### 3 动态特性分析

根据图 1 所示的承载舱结构, 建立其有限元模型 (见图 3)。该模型使用 Beam188 杆单元划分桁架体, 使用 Solid45 体单元划分结构体。结构

体用于模拟空间相机的质量和质心。结构体与桁架体之间通过节点耦合实现连接。表 1 列出了有限元模型中使用的碳纤维材料的材料特性 [9-10]。

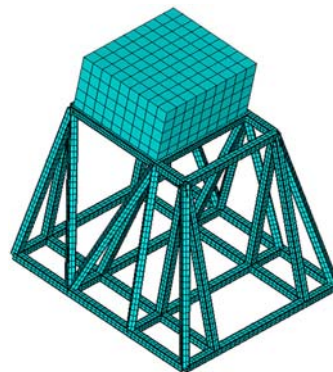


图 3 承载舱的有限元模型

表 1 碳纤维的材料特性

| 材料名称     | 密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 弹性模量 $E$ (GPa) | 泊松比 $\mu$ | 拉伸强度 $\sigma_b$ (GPa) |
|----------|--------------------------------|----------------|-----------|-----------------------|
| 高强碳纤维/环氧 | 1.45                           | 140            | 0.27      | 1.5                   |

根据计算机仿真试验法<sup>[11]</sup>, 分析了多组杆截面的承载舱结构。表 2 列出了多种截面尺寸条件下承载舱 X、Y 和 Z 方向上的一阶模态频率。

表 2 X、Y 和 Z 方向上的一阶模态频率

| 截面尺寸    | X 向   | Y 向  | Z 向  | 质量   |
|---------|-------|------|------|------|
| 40×40×3 | 302.4 | 51.6 | 78.9 | 14.3 |
| 35×35×3 | 280.9 | 46.9 | 72.8 | 12.5 |
| 30×30×3 | 263.7 | 42.1 | 66.5 | 10.6 |
| 25×25×3 | 233.1 | 37.1 | 59.7 | 8.74 |

由表 2 可知, 承载舱的最优杆截面尺寸在 25 mm×25 mm×3 mm ~ 30 mm×30 mm×3 mm 之间。另外, 承载舱的 X 向一阶模态频率和质量一直满足要求, 而 Y 向一阶模态频率比 Z 向的小, 因此只需使 Y 向一阶模态频率满足设计要求即可。利用三次样条插值法确定的承载舱的杆截面尺寸为 28 mm×28 mm×3 mm。图 4 所示为此条件下承载舱在 X、Y 和 Z 方向上的一阶模态振型。

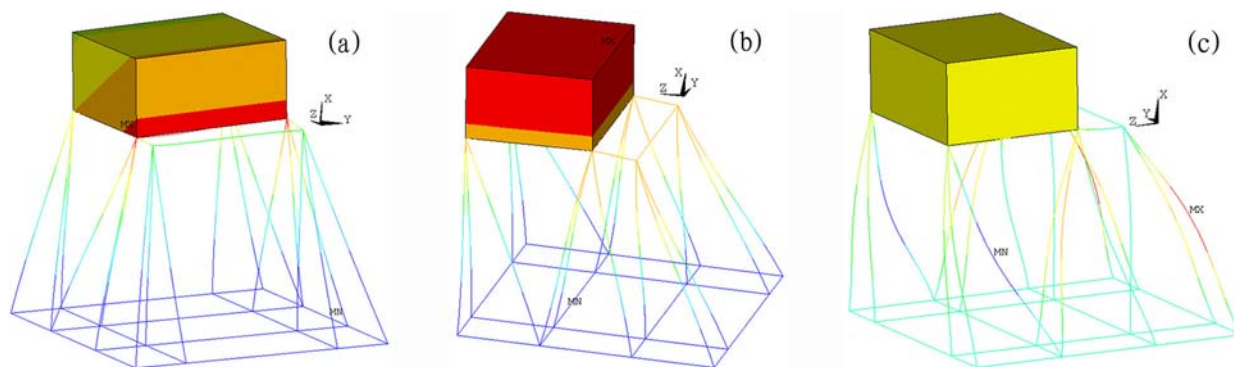


图 4 X、Y 和 Z 方向上的一阶模态振型: (a) Y 向一阶模态振型 (平移, 40.1 Hz); (b) Z 向一阶模态振型 (平移, 63.7 Hz); (c) X 向一阶模态振型 (平移, 251.9 Hz)

有限元模型与工程产品之间存在的差别是分析误差存在的重要原因。本文对空间相机进行了模型简化,即通过调整结构体的密度和几何尺寸分别模拟了空间相机的质量和质心位置。但是,空间相机的质量分布和转动惯量等很难模拟。尽管如此,在尽量保证与工程产品一致性的基础上,有限元分析能够在一定程度上为产品设计提供数据参考。

#### 4 结束语

本文采用高强度碳纤维复合材料以及具有合理拓扑形式的桁架结构,建立了承载舱和空间相机结构系统的有限元模型。利用计算机模拟试验、渐次逼近法和三次样条插值法,优化了杆截面尺寸,获得了符合设计要求的承载舱结构,为空间相机与卫星平台的对接提供了轻质且动态特性优良的空间结构。

#### 参考文献

- [1] 安源,贾学志,张雷,等.基于碳纤维复合材料的空间相机高比刚度主承力板优化设计[J].*光学·精密工程*,2013,21(2):416-422.
- [2] 王永宪,王兵,任建岳.空间相机碳纤维支撑结构改进及拓扑优化设计[J].*红外与激光工程*,2008,38(4):702-704.
- [3] 于敬晖,刘永琪,王明寅,等.碳纤维复合材料镜筒研制[J].*纤维复合材料*,2009,11(2):30-31.
- [4] 贾学志,张雷,金光.空间相机桁架支撑结构满应力优化设计与试验[J].*空间科学学报*,2013,33(3):346-352.
- [5] 陈长征,赵玲玲,刘磊,等.空间遥感器支撑桁架的模态计算与试验[J].*光学·精密工程*,2007,15(8):1164-1169.
- [6] 初昶波,柴文义,张昊苏,等.航天相机碳纤维外罩结构及模态分析和试验[J].*红外与激光工程*,2013,42(4):1033-1037.
- [7] 张雷,金光.轻型空间相机桁架结构设计及模态分析[J].*空间科学学报*,2008,28(3):260-263.
- [8] 袁涛,何欣,刘强.离轴四反光谱成像仪的动态特性分析[J].*光学技术*,2010,36(5):721-724.
- [9] 盛磊,陈萍.碳纤维复合材料在光学遥感器中的应用探讨[J].*航天返回与遥感*,2008,29(3):33-37.
- [10] 李威,刘宏伟.空间光学遥感器中碳纤维复合材料精密支撑构件的结构稳定性[J].*光学·精密工程*,2008,16(11):2173-2179.
- [11] 方开泰,马长兴.正交与均匀试验设计[M].北京:科学出版社,2001.

#### 新闻动态 News

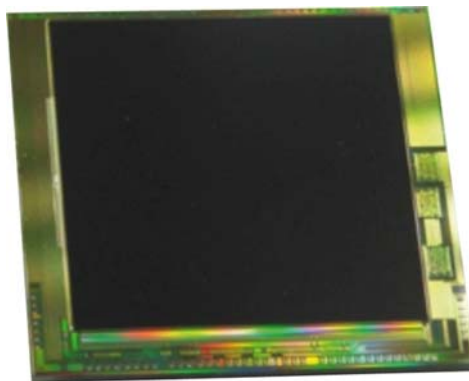
### 法国 Sofradir 公司推出大规格即用型可见光-短波红外探测器

据 [www.sofradir.com](http://www.sofradir.com) 网站报道,法国 Sofradir 公司最近推出了一款新的像元间距为  $15\ \mu\text{m}$  的  $1024\times 1024$  元即用型可见光-短波红外探测器 ( $0.35\sim 2.5\ \mu\text{m}$ )——下一代全色 (NGP) 探测器。该探测器可以为空间应用中的成像光谱仪以及其他一些观测仪器提供更高的空间分辨率或光谱分辨率,从而提高科学家们准确发现和描述化学现象的能力。同样重要的是,由于 NGP 探测器为即用式设计,航天机构用户能够根据任一光谱波段需求对其进行快速调整。该探测器不仅可以为系统集成商提供更大的灵活性,而且还可以缩短航天任务的研制周期。

与 Sofradir 公司目前用于观测卫星或航天器的 SATURN 型红外凝视阵列产品相比,NGP 探

测器的像元数增加了三倍。探测器的规格越大,图像分辨率就越高,因此 NGP 探测器不仅非常适合未来的高光谱或光谱学应用,而且还很适合对地观测或深空科学应用。

事实上,NGP 探测器今年就已被选择用于 Sentinel-5 任务。该探测器计划于 2021 年搭载 MetOp-SG 卫星升空,并将从极地轨道上对地球大气层进行监测。



□ 岳桢千