

空间相机桁架式支撑结构的集成优化设计

袁 健^{1,2}, 沙 巍¹, 陈长征¹, 张星祥¹, 任建岳¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 桁架式支撑结构在大中型离轴三反(TMA)空间相机中使用广泛,如何提高其动力学特性是此类相机研制过程中的关键。针对桁架结构的设计问题,提出了通过集成优化确定桁架结构动力学特性最佳位置的方法,使用实验设计的手段,对影响其动力学特性的各桁架杆位置变量进行了研究,分析了该优化问题解空间的特点;为了实现桁架结构的全局最优设计,以提高支撑结构的一阶自然频率为目标,使用多岛遗传算法(Multi-island GA)进行全局寻优求解。利用有限元分析的方法,得到该桁架经优化后的一阶自然频率 107.72 Hz,较未经优化的初始结构(83.45 Hz)提升了 29%,效果显著。该研究提出的集成优化模型和分析方法为此类桁架结构的设计提出了新的思路。

关键词: 桁架式支撑结构; 空间相机; 集成优化; 实验设计; 多岛遗传算法

中图分类号: TP391.7 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)12-3661-06

Integrated optimization design of truss-supporting structure for space camera

Yuan Jian^{1,2}, Sha We¹, Chen Changzheng¹, Zhang Xingxiang¹, Ren Jianyue¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Truss-supporting structure was widely used among TMA space camera of large or middle size, and how to improve its dynamics characters was the key to the study of cameras alike. As to the design problem of truss structure, bring forward a method of ascertaining the position of the trusses via integrated optimization, study the influence of position variables of the trusses on dynamics characters via designed of experiment, analysed the characteristic of its resolution space. In order to realize whole-space optimized designed of truss, used multi-island genetic algorithm to find the bested resolution, with the objective of improving the 1st-frequency. Used FEM method, find the 1st-frequency of optimized design was 107.72 Hz, which was 29% improved compared with original design (83.45 Hz). The integrated optimization modeling and the analysis method in this study offer a new way for the design of truss structure.

Key words: truss-supporting structure; space camera; integrated optimization; design of experiment; multi-island genetic algorithm

收稿日期: 2015-04-05; 修订日期: 2015-05-10

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 袁健(1990-), 男, 硕士生, 主要从事空间相机光机结构设计方面的研究工作。Email: jyuan@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 任建岳(1952-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学遥感器的研制和性能评价方面的研究工作。Email: renjy@ciomp.ac.cn

0 引言

随着空间技术的不断发展,人们对空间遥感器的技术要求越来越高,高分辨率、宽视场逐渐成为现代空间相机的发展方向。离轴三反系统(TMA)因其具有大视场、长焦距、无色差、无中心遮拦等优点,被各国科研人员广泛采用^[1];但由于此类遥感器对各主要光学元件之间的相对位置精度要求极高,以及具有非轴对称结构等特点,使得其研制和装调过程非常困难。其中,遥感器的主支撑结构起到连接各组件并保证其相对位置精度的作用,其性能的优劣直接影响到空间相机的成像质量。

空间相机在火箭发射和在轨运行时要承受冲击、过载、振动等复杂的动力学环境^[2-3],作为承受动力学载荷的主要环节之一,主支撑结构的动态特性将直接影响整机的动力学性能。因此,能否设计出结构比刚度、动力学特性好的主支撑结构,是此类空间相机研制过程中的关键环节。

桁架式支撑结构在现代遥感器中被广泛采用,如国外的 Spot 相机、哈勃望远镜^[4],我国的空间太阳望远镜等。目前,国内对空间相机桁架式支撑结构的研究主要有:张雷、李畅等分别使用瑞利法研究了桁架结构的基频,并对初始结构进行了改良^[4-5];贾学志等采用满应力法对桁架结构进行优化,并设计了相应的实验来验证^[6];杨近松、张雷等分别研究了不同桁架结构的模态特性^[7-8],等等。

文中针对离轴三反系统空间相机中常见的桁架式支撑结构,使用集成优化技术对其进行建模和设计研究。分析了设计问题中各参数之间的关系,对基于现有经验设计的初始模型进行优化,得到了动态特性更加优良的结构。

1 桁架式支撑结构

1.1 桁架式支撑结构

在长焦距的空间遥感器中,由于其体积庞大,往往采用桁架式结构。桁架式结构不仅可以得到较高的比刚度和轻量化率,还可以使得相机的结构紧凑并协调各部件的空间布局。桁架式支撑结构在大口径、长焦距的离轴三反空间相机中具有良好的应用前景。

对于离轴三反空间相机中使用的支撑结构来

说,不仅要求其可以为各主要光学元件之间提供共准面、保证各连接面的高精度要求,而且还要求可以方便地在其上面安装各类组件、反射镜以便于调焦。为了能够满足这些功能特性,桁架式支撑结构主要由前、后框架和桁架杆三部分组成,如图 1 所示。具体设计时,前后框架的主要结构参数由各反射镜的口径和相机的接口位置确定,然后对其内部进行轻量化处理,形成网格状的筋板结构;桁架杆部分起到连接前后框架的作用,目前空间相机中的桁架结构主要有 6 杆结构、8 杆结构等,需视实际情况而定,文中所讨论的 TMA 相机中采用 8 杆结构;各桁架杆通常为中空圆柱结构,装调过程中既承受拉压载荷又承受弯曲载荷,其初始位置的确定需要设计人员进行定性的分析、试算,各桁架在框架上固结点的选择以及桁架杆之间相对位置关系的确定均会对整机的动态特性造成重大影响。文中集中研究如何进行科学的桁架设计,确定桁架杆的最佳位置,以保证空间相机具有最大的一阶自然频率。

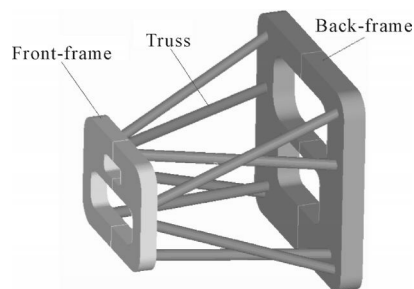


图 1 空间相机桁架式支撑结构示意图

Fig.1 Schematic of truss-supporting structure for space camera

1.2 支撑结构材料的选择

碳纤维复合材料(CFRP)具有密度低、刚度大、低线胀系数、模量可以设计等特点^[9],非常适合用来制作航天器的相关结构;但是由于碳纤维材料具有各向异性,复杂工况下难以保证前后框架之间的稳定性,且容易因受潮而变形,所以在现代空间遥感器的桁架式支撑结构中,通常仅桁架杆采用碳纤维材料来制作,框架部分则需选用其他材料。高体份的 SiC/Al 由于具有高比模量、低线胀系数、高导热率、导电等特点而被广泛的应用到航空航天的各领域中^[10],适合用来制作前后框架;同时,为了弥补碳纤维不易成型的缺点,在桁架杆与框架的连接处往往使用钛合金(TC4)材料制作结合部。在文中讨论的桁架式主

支撑结构中,前后框架由高体份的 SiC/Al 制成,桁架杆由碳纤维复合材料制成,建模时将结合部省略,桁架杆直接与框架连接;航天器中常用的结构材料的物理属性如表 1 所示。

表 1 相关材料的物理属性表

Tab.1 Physical properties of correlative materials

| Material | Density ρ /(kg/m ³) | Young's modulus E /GPa | Thermal conductivity λ (W/mK) | Thermal expansivity α (10 ⁻⁶ /K) |
|----------|---|-----------------------------|---|--|
| SiC/Al | 3 000 | 180 | 225 | 8.0 |
| CFRP | 1 560 | 140 | 35 | 0.1 |
| TC4 | 4 400 | 114 | 7.4 | 9.1 |
| LC9 | 2 800 | 71 | 142 | 23.6 |
| 4J36 | 8 900 | 141 | 13.7 | 0.65 |

2 集成优化设计过程

2.1 集成优化流程

文中首先根据集成优化问题,建立初始几何模型,然后改变关键参数,生成相应的有限元模型并提交解算器解算,最后提取结果、进行分析,进而转入下一次的分析流程,该集成优化过程如图 2 所示。将几何模型的修改与有限元分析集成在一起,交由计算机进行处理,这样不仅可以减少设计人员的工作量、大幅提高设计效率,更可以在分析处理数据时采用复杂的算法,从而获得最优解。

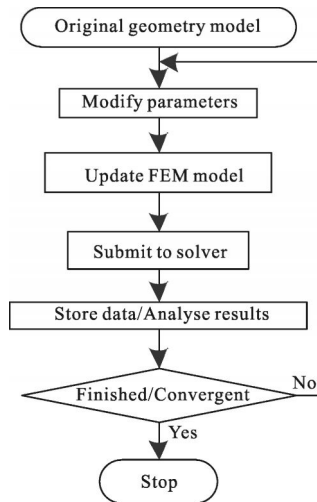


图 2 集成优化流程图

Fig.2 Flow chart of integrated optimization

2.2 建模方法

在桁架设计阶段,把经过轻量化处理后的前后

框架简化成与其质量相等的实心框架;在有限元模型中,用一维梁单元模拟桁架杆。受反射镜尺寸限制,后框架的外轮廓尺寸为:长 $L_1=1\ 800\ \text{mm}$,宽 $W_1=1\ 400\ \text{mm}$,厚 $T_1=90\ \text{mm}$;前框架的外轮廓尺寸为:长 $L_2=1\ 430\ \text{mm}$,宽 $W_2=680\ \text{mm}$,厚 $T_2=70\ \text{mm}$,前后框架间距 $G=1\ 560\ \text{mm}$,桁架杆的横截面为同心圆环,其外径 $D_1=100\ \text{mm}$ 、壁厚 $10\ \text{mm}$,模型如图 3 所示。

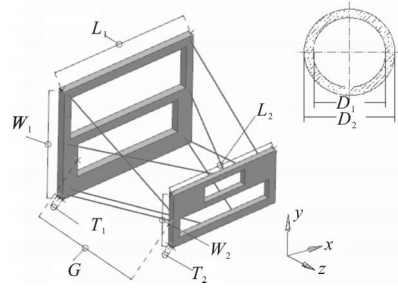


图 3 模型示意图

Fig.3 Model schematic

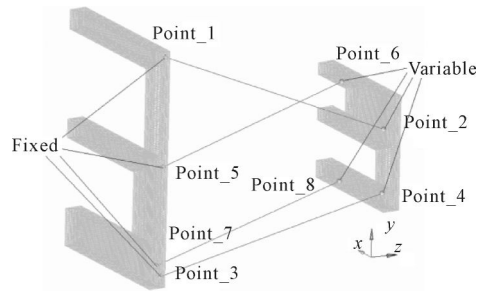


图 4 变量示意图

Fig.4 Schematic of variables

在描述桁架杆之间的位置关系时,为了便于参数化,文中舍弃常用的空间夹角这组变量,而是用桁架杆端部节点的绝对位置来描述。考虑到相机整体的对称性,主支撑结构必关于 $y-z$ 平面对称,故只需讨论一侧的 4 根桁架位置即可。将 4 根桁架杆上两端的 8 个端点编号(图 4)。后框架上桁架杆的连接点位置变化的范围不大,所以在进行集成设计时,将后框架上的 4 个端点(即图 4 中的点 1,点 3,点 5,点 7)固定,仅令前框架上的 4 个端点(即图 4 中的点 2,点 4,点 6,点 8)可以变化位置。点 2、点 4、点 6、点 8 均可以在 $x-y$ 平面上移动,且各点具有两个自由度,分别对应 x 方向和 y 方向上的位置,将这些变量记为: $x_2, y_2, x_4, y_4, x_6, y_6, x_8, y_8$ 。各桁架杆位置在变化的过程中,要遵循以下原则:桁架杆不得遮挡光路;各桁架杆之间不得发生干涉;应预留出桁架杆与框架

之间结合部的位置; 保证其他组件具有足够的安装位置, 等等。因此, 为了使各组采样点值具有实际意义, 必须规定各活动端点的变化区域, 如图 5 所示。

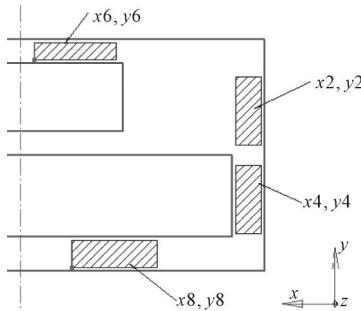


图 5 各变量变化区域示意图

Fig.5 Schematic of domains for the variables

2.3 问题分析

图 5 所标识的各阴影区域对应各相关设计变量的取值范围, 该范围如表 2 所示, 表中以绝对坐标值的形式表示初始结构的位置, 以相对初始结构变化量的形式表示各变量的取值范围。文中所讨论的优化问题以主支撑结构的一阶自然频率最高为目标函数, 集成优化模型中涉及 8 个变量, 设计空间很大。为了揭露各变量对目标函数影响程度的大小以及各变量之间的相互关系, 先采用实验设计 (Design of Experiment, DOE) 的方法对该问题进行试算, 以获得对该问题的初步理解。采用优化拉丁超立方设计 (Optimal Latin Hypercube Design, Opt LHD) 的方法, 采样点数为 200 个, 实验结果如图 6 所示。根据以上算得的数据, 分别作出各桁架末端端点横坐标(x_2 、 x_4 、 x_6 、 x_8)和纵坐标(y_2 、 y_4 、 y_6 、 y_8)对目标函数的灵敏度曲线, 如图 7 所示, 从中可见点 2 和点 4 的纵坐标、点 6 和点 8 的横坐标对目标函数的影响最大, 这与由经验公式所获得的结论是相符的。为了进一步描述设计空间, 根据样本点建立问题的四阶响应面模型, 分别作出 y_2 和 y_4 、 x_6 和 x_8 对一阶自然频率的响应面图, 如图 8 所示。由样本点建立问题的二次回归模型, 计算出各变量对目标函数贡献程度的百分比, 并由此作出帕累托图, 如图 9 所示, 右侧条形表示正效应, 左侧条形表示负效应; 从中可以同样看出 y_2 、 y_4 、 x_6 、 x_8 对目标函数影响较大, 而且某些不同变量之间(如 x_6 与 y_2 、 x_6 与 y_4 、 x_6 与 x_8 等)存在较大的耦合, 该问题的解空间非常复杂。

表 2 各设计变量的变化范围

Tab.2 Domains of design variables

| Variable | Original_position | Design_domain |
|----------|-------------------|---------------|
| x_2 | -665 | [-35, 30] |
| y_2 | 540 | [-20, 180] |
| x_4 | -665 | [-35, 30] |
| y_4 | 440 | [-180, 20] |
| x_6 | -50 | [-210, 10] |
| y_6 | 790 | [-10, 20] |
| x_8 | -190 | [-210, 40] |
| y_8 | 200 | [-30, 30] |

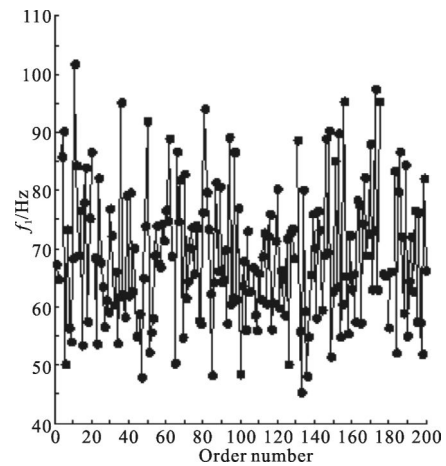


图 6 DOE 结果图

Fig.6 Results of DOE

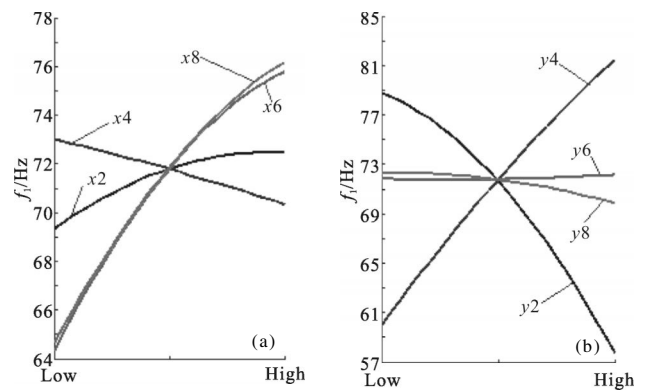


图 7 各变量对一阶自然频率的灵敏度曲线

Fig.7 Sensitivity curves of variables on 1st-order frequency

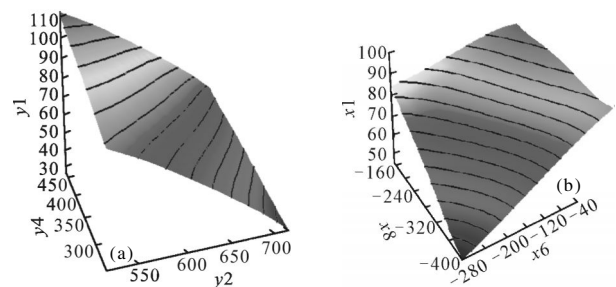


图 8 响应面图

Fig.8 RSM plot

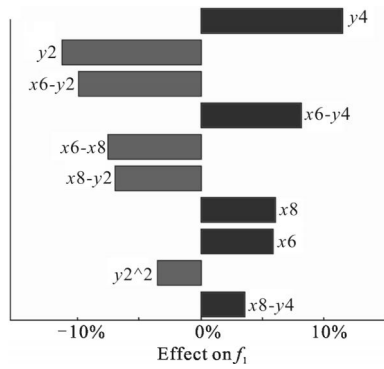


图 9 帕累托图
Fig.9 Pareto plot

2.4 变量优化

通过以上的分析得知,该问题的设计空间大,且解空间复杂,若单纯靠经验公式来设计此类桁架结构,则极易陷入局部最优解,而忽略其他可行解;针对这一特性,采用多岛遗传算法(Multi-island Genetic Algorithm)对原设计问题进行全局优化求解。

多岛遗传算法是在并行分布遗传算法的基础上经改进而来,它具有全局求解能力强且效率高等特点,适合用来求解设计空间大、设计变量相互关系复杂的优化问题。该问题以一阶自然频率(f_1)最大为优化目标,设置每个子代的规模、子代的数量、进化代数均为 10,变异概率为 1%,交叉概率为 100%,迁移的间隔代数为 5,子代间的迁移率为 1%,迭代的过程如图 10 所示。根据获得的全局最优解建立有限元分析模型,得到优化后结果的一阶振型图如图 11 所示,前三阶自然频率及其对应振型如表 3 所示。将得

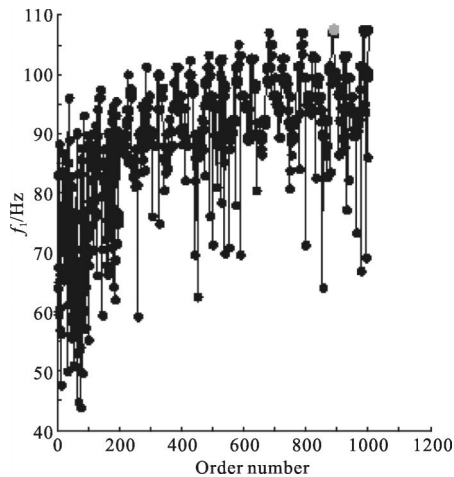


图 10 迭代优化过程

Fig.10 History of iteration during optimization

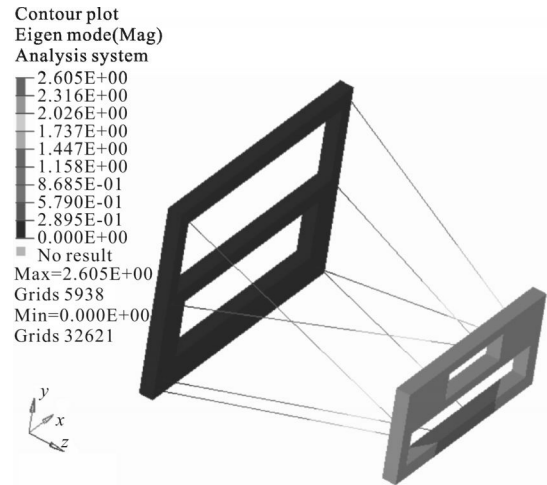


图 11 优化结果的一阶振型图

Fig.11 1st-order vibration diagram of optimized result

表 3 前三阶自然频率及其振型

Tab.3 First three frequency and vibration mode

| Number | Frequency/Hz | Vibration mode |
|-----------|--------------|-----------------------------------|
| 1st-order | 107.72 | Front frame Y_direction vibration |
| 2nd-order | 110.82 | Front frame X_direction vibration |
| 3rd-order | 152.82 | Front frame Z_axis rotation |

到的最优位置结果与初始设计进行比较,如表 4 所示,一阶频率由 83.45 Hz 提高到 107.72 Hz,提升了 29%,效果显著。

表 4 优化前后结果对照表

Tab.4 Comparison between original design and the optimized

| Variable | Original | Optimized |
|---------------|----------|-----------|
| x2 | -685 | -654 |
| y2 | 600 | 534 |
| x4 | -685 | -661 |
| y4 | 415 | 437 |
| x6 | -55 | -68 |
| y6 | 780 | 808 |
| x8 | -315 | -152 |
| y8 | 225 | 207 |
| 1st_frequency | 83.45 Hz | 107.72 Hz |
| Advance_ratio | | 29% |

3 结 论

文中针对 TMA 空间相机桁架式支撑结构中桁架杆位置的优化设计问题,提出了使用集成优化的

方法对初始结构进行优化的方案,具体阐述了此类部件的建模方法。分析了某空间相机桁架式结构的设计问题,发现各参数对一阶自然频率的影响显著不同,变量之间存在不同程度的耦合,说明该问题的解空间很复杂;使用多岛遗传算法对设计问题进行优化,得到了全局最优解。优化后一阶自然频率为 107.72 Hz,初始结构的一阶自然频率为 83.45 Hz,提升了 29%。该方法适用性强,不仅对空间相机中相关结构的研制具有借鉴意义,而且对任何桁架式组件的设计均具有普遍的参考价值。

参考文献:

- [1] Zhang Keke, Ruan Ningjuan, Fu Danying. Analysis and consideration of development of overseas space off-axis TMA system camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(3): 63-79. (in Chinese)
张科科, 阮宁娟, 傅丹鹰. 国外空间用三反离轴相机发展分析与思考[J]. *航天返回与遥感*, 2008, 29(3): 63-79.
- [2] Li Zhilai, Xue Donglin, Zhang Xuejun. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2485-2490. (in Chinese)
李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12): 2485-2490.
- [3] Sun Dewei, Zhang Guangyu, Wang Wuyi, et al. Structural design and dynamic analysis of the flexible support of body tube in space camera[J]. *Mechinery Design & Manufacture*, 2010, 10: 1-3. (in Chinese)
孙德伟, 张广玉, 王武义, 等. 空间相机镜筒柔性支撑结构设计及动力学分析[J]. *机械设计与制造*, 2010, 10: 1-3.
- [4] Zhang Lei, Jia Xuezhi. Design and optimization of trussed supporting structure for off-axis three-mirror reflective space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(3): 603-608. (in Chinese)
张雷, 贾学志. 大型离轴三反相机桁架式主支撑结构的设计与优化[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 603-608.
- [5] Li Chang, He Xin. Design and optimization of trussed structure for space camera based on Rayleigh algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (9): 2405-2409. (in Chinese)
李畅, 何欣. 基于 Rayleigh 算法的空间相机桁架结构与优化[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2405-2409.
- [6] Jia Xuezhi, Zhang Lei, Jin Guang. Optimum design based on full stress ruler and test test for truss of space camera [J]. *Chin J Space Sci*, 2013, 33(3): 346-352. (in Chinese)
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.
- [7] Yang Jinsong. Model correlation analysis of frame structure of a space camera [J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(1): 274-276. (in Chinese)
杨近松. 空间相机桁架结构模态相关性分析[J]. *计算机仿真*, 2006, 23(1): 274-276.
- [8] Zhang Lei, Jin Guang. Structure design and modes analysis for the truss of light high resolution space camera [J]. *Chin J Space Sci*, 2008, 28(3): 260-263. (in Chinese)
张雷, 金光. 轻型空间相机桁架结构与模态分析[J]. *空间科学学报*, 2008, 28(3): 260-263.
- [9] Li Zhilai. Truss support structure design between primary mirror and secondary mirror in long focal length space camera [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42 (1): 89-93. (in Chinese)
李志来. 长焦距空间相机主次镜间桁架支撑结构设计[J]. *激光与红外*, 2012, 42(1): 89-93.
- [10] Ren Jianyue, Chen Changzheng, He Bin, et al. Application of SiC and SiC/Al to TMA optical remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16 (12): 2537-2543. (in Chinese)
任建岳, 陈长征, 何斌, 等. SiC 和 SiC/Al 在 TMA 空间遥感器中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16 (12): 2537-2543.