

文章编号 1004-924X(2012)06-1257-08

离轴空间遥感器主支撑结构设计

辛宏伟¹, 关英俊^{2*}, 柴方茂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. 长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要:长焦距离轴三反(TMA)空间光学遥感器各光学元件的位置精度和动态稳定性与其主支撑结构相关,因此,本文研究了遥感器主支撑结构设计方案。对比分析了主支撑结构的常用形式,确定了桁架结构方案,并对其进行了材料选择和连接工艺分析。推导了三杆结构(桁架基本单元)的一阶频率解析式,并确定了其最佳形式。在初始设计的基础上,利用灵敏度分析和参数优化设计方法得到了一种 24 杆式主支撑结构。作为验证,对该支撑结构进行了静态翻转和动力学试验。试验结果表明,主支撑由竖直状态翻转到水平状态后,前端倾角变化小于 $10''$,一阶固有频率为 55 Hz,振动试验中支杆最大应力为 135 MPa,满足各项设计指标要求。

关键词:空间遥感器;离轴三反遥感器;主支撑结构;桁架结构;优化设计

中图分类号:V447.1;V443.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122006.1257

Design of main support of off-axis space remote sensor

XIN Hong-wei¹, GUAN Ying-jun^{2*}, CHAI Fang-mao¹

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

- School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)*

** Corresponding author, E-mail: gyj5460@sohu.com*

Abstract: The position precision and dynamic stability of optical elements for an off-axis Three-mirror Anastigmatic (TMA) space remote sensor are dependent on its main support structure, therefore, this paper researches the design scheme of the main support structure for the TMA space remote sensor. After analysis of the common forms of main support structure, a composing of truss support structure was determined, and its materials and connection technique were discussed. The analytical solution for the first order natural frequency of the structure with three struts was derived and the best one was selected. On the basis of a original design, the sensitivity analysis and parameter optimization were used to obtain a main support structure with 24 struts, then it was verified by the static reversal and a dynamic test. Test results show that the front rotation angle change of the main support structure is less than $10''$ and the first order natural frequency is 55 Hz, when it flips from a vertical state to a horizontal state. Furthermore, the maximum stress of the main support structure is 135

收稿日期:2012-01-29;修订日期:2012-03-08.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA7020107)

MPa during dynamic tests, which meets the design requirements of all indexes.

Key words: space remote sensor; off-axis Three-mirror Anastigmatic (TMA) sensor; main support structure; truss support structure; optimum design

1 引言

近年来,空间对地观测技术发展迅猛,大视场高分辨率的空间光学遥感器成为了这一领域的研究热点。离轴三反(TMA)光学系统以其无中心遮拦、能量利用率高、易于实现大视场、高分辨率^[1]等诸多优点受到各空间大国的普遍关注。由于其光机结构具有非轴对称的特点,所以相对于同轴轴对称形式的空间遥感器,它的支撑结构设计和系统装调是公认的技术难点。特别是为了提高空间遥感器的观测能力,需要不断增大系统的焦距和相对孔径,而在长焦距 TMA 光学系统中,各光学元件相对于短焦距系统位置精度要求更加严格,这给主支撑结构设计带来了巨大的挑战。

目前,空间遥感器可采用的主支撑结构有薄壁式和桁架式 2 种。美国在 2001 年发射的 Quickbird-2 卫星所搭载的空间遥感器的焦距达 8.8 m,其地面分辨率优于 0.15 m,主支撑采用中间镂空的全金属薄壁结构,是薄壁式主支撑结构的典型代表。而哈勃、SPOT 等更多的大中型空间遥感器则普遍采用了桁架式主支撑结构^[2-3]。我国也在积极研制离轴 TMA 长焦距空间遥感器,并对遥感器的主支撑结构进行了相关研究^[4-9]。相对于国内其他的离轴 TMA 空间遥感器,本文所研究的空间遥感器焦距最长,技术难度最大。该遥感器要求位于其最前端的次镜在重力作用下指向精度误差小于 10",主支撑结构一阶固有频率不低于 55 Hz,发射过程中不产生塑性变形,不破坏。因此,主支撑结构的设计是本遥感器中设计难度最大、结构最复杂的体系,关乎整个任务的成败。

本文根据国内现有的技术水平,合理地选择该遥感器的主支撑结构方案,优选了桁架结构材料,确定了桁架布局,并经理论推导与优化设计,得到了一种 24 杆式桁架主支撑结构。经静态翻转试验和动力学试验验证了该主支撑结构能够满

足设计指标要求。

2 主支撑结构方式的确定

主支撑结构既要满足各光学元件的安装位置精度,又要在发射阶段有较好的动态稳定性,这就对其结构形式选择、材料选择、具体的结构布局及参数优化设计等方面提出了较高要求。

2.1 系统对主支撑结构的基本要求

在本文所研究的空间遥感器中,次镜组件处在整个结构的最高端,在系统集成情况下,由于重力作用,次镜的刚体位移将明显变大,相对于其他光学元件其位置精度降低更加明显。在动态载荷作用下,如主支撑的动态刚度过低,次镜处的动态加速度响应将显著放大,易导致次镜支撑结构的破坏。主支撑的首要任务就是保证次镜等光学元件具有较高的静态和动态稳定性。

其次,主支撑本身要具有足够高的抗振性,必须确保在承受来自于发射状态的各种动态载荷(如各种振动、过载的作用)作用时,其自身不产生塑性变形,各零件间不得产生相对滑动和松弛;同时必须保证整机具有足够高的基频,以免产生共振。

最后,主支撑结构必须便于遥感器整体的安装和调试,其整体尺寸参数要满足系统要求。

2.2 主支撑结构形式的选择

目前,国外许多长焦遥感器的主支撑结构常采用轻质材料整体铸造成型,再配以冷加工技术达到使用要求。这种整体框架结构最大的优点在于整体性强,只需对安装光学元件的部位进行重点关注,不需要自身的装配工艺就可获得高品质的主支撑结构。然而,此种方案必须依靠较高的卫星平台技术和先进的加工技术才能得以实现。

我国尚不具备空间用大型轻质材料的整体铸造成型技术,根据目前我国所具有的技术条件,综合考虑周期、加工工艺性、遥感器整体的重量限制等因素,采用高精度的桁架结构更容易实现长焦

距 TMA 遥感器主支撑的大规模化。其主要特点是采用多零件如基板、支撑杆、连接座等各零部件的分时、分序加工,最后依靠高精度的辅助工装进行组合装配,获得所需的主支撑结构。表 1 为桁架结构和整体框架结构的性能对比。

表 1 桁架结构与整体框架结构的性能对比

Tab.1 Comparison of performance between truss and integrative frame

工艺性能	桁架结构	整体框架结构
加工周期	可控性强	可控性弱
加工工艺性	好	难
装配工艺性	难	不需要
可修复性	强	弱
重量可控性	强	弱
规模可控性	强	弱
精度可控性	依靠良好的装配工艺和高精度的工装	对重点部位进行质量控制即可

2.3 材料选择

桁架结构性能的优劣在很大程度上取决于材料的性能,为此,首先应该合理地选择材料,然后再设计合理的结构形式来达到桁架结构的最优性能。目前,碳纤维作为一种高比刚度的材料,被广泛应用于航天领域^[10-12],因此,本文将碳纤维作为桁架支撑杆的最佳选择。

在制作碳纤维杆件时,除选用性能优良的碳素纤维外,还需采用特殊的铺层工艺,以满足力学性能要求。由于碳纤维冷加工(研磨、车、铣加工等)性能差,且形位、尺寸公差不易保证,对已成型后的杆件,不适宜在其基体上进行机械加工,因进行机械加工会破坏碳纤维基体的连续性,其直接传递载荷的途径将中断,影响杆件的使用性能。为保证碳纤维杆件的安装及使用性能要求,在碳纤维杆的成型过程中,采用在基体上预埋金属结构件的工艺措施,并采用混合连接方式(销钉和胶层粘接)来提高构件之间的连接强度。

为了提高加工工艺的可控性,基板选用高比刚度、高强度且加工工艺成熟的钛合金(TC4)制作,连接座选用铝基复合材料(SiC/Al)制作。具体材料属性见表 2。

表 2 桁架结构材料属性

Tab.2 Material properties of truss structure

材料	密度 ρ g/mm ³	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
碳纤维复合材料杆	1.65	140	0.18
TC4	4.44	109	0.29
SiC/Al	2.94	213	0.23

3 桁架结构模态求解

如何保证主支撑具有较高的刚度和强度,同时保证具有较轻的重量,是机械设计所必需考虑的,要达到上述设计要求必须进行优化设计。优化设计的前提是必须具有良好的结构雏形,而作为多杆系的桁架结构,可以分解为若干的基本单元,三杆结构可以视为杆系的最基本组成,只有将基本的杆系结构做到最优,并在此基础之上优化组合才能得到性能优良的桁架结构。

3.1 三杆结构的刚度分析

三杆结构是桁架的最基本构成单位,通过三杆结构模态的解析求解,可以定性确定三杆结构的最佳结构形式,为以有限元为基础的结构参数的优化设计奠定基础。

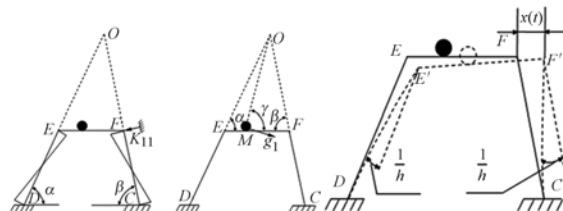


图 1 三杆结构模态分析

Fig.1 Modal analysis of three-bar structure

将三杆结构的基本单元简化为图 1 的 DE、EF、FC 的结构形式,由结构力学得(这里为辨识方便,只是将位移的方向定义为 $x(t)$,而并不代表遥感器真正的分析坐标系):设 F 处质点在某一时刻的水平振幅为 $x(t)$,则其实际振幅为 $\frac{x(t)}{\sin \beta}$,E 点处的实际振幅为 $\frac{x(t)}{\sin \alpha}$ 。在 F 处预设顶杆,方向垂直于杆 CD,设顶杆的支反力为 R_{1p} ,用位移法建立运动平衡方程为:

$$k_{11} \frac{x(t)}{\sin \beta} + R_{1p}(t) = 0 \quad (1)$$

因为系统的位移瞬心为 O,将惯性力作用到质点上,作 $M_p(t)$ 图,并取横梁为隔离体。由 $\sum M_0 = 0$ 得:

$$m \frac{\ddot{x}(t)}{\sin \gamma} L_{MO} = R_{1p} L_{FO}, \quad (2)$$

由此得:

$$R_{1p} = m \frac{L_{MO} \ddot{x}(t)}{L_{FO} \sin \gamma}, \quad (3)$$

其中, L_{FO} 为瞬心到 F 点的距离, L_{MO} 为瞬心到质心 M 点的距离。

在 $\triangle FOE$ 中,由正弦定理得:

$$\begin{cases} L_{FO} = \frac{L \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \\ L_{EO} = \frac{L \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \end{cases}, \quad (4)$$

R_{1p} 的方向为沿预设的顶杆的方向。

为求 k_{11} , 设 F 点作水平振幅为 1 的振动, 实际振幅为 $FF' = \frac{1}{\sin \beta}$, 方向垂直于杆 CF, 由于 E 点水平振幅同样为 1, 则实际振幅为 $EE' = \frac{1}{\sin \alpha}$, 方向垂直于杆 DE。杆 EF 相对于杆 DE 和 CF 的转角 $\Phi_{EF-DE}, \Phi_{EF-FC}$:

$$\Phi_{EF-DE} = \frac{EE'}{DE} = \frac{\frac{1}{\sin \alpha}}{\frac{h}{\sin \alpha}} = \frac{1}{h}. \quad (5)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(6EI + 12EIh)(\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta) + (6EI + 64EIh)(\sin \alpha + \sin \beta)}{h^3} \frac{m L_{MO} \sin \beta}{L_{FO} \sin \gamma}}. \quad (10)$$

在进行具体的主支撑桁架结构设计时,考虑到遥感器体积和重量限制,一般桁架杆间的角度不宜过小。针对本遥感器,桁架杆间的角度在 $45^\circ \sim 135^\circ$ 间取值均能满足结构排部的要求。但观察式(10)可以发现,当两杆的角度和超过 180° 时,三杆结构的自然频率将显著下降。为验证这一结论,在有限元软件中建立了同种截面尺寸和材料属性的三杆结构的有限元模型,如图 2 所示,杆的夹角分别为 $45^\circ, 90^\circ$ 和 120° , 模态分析结果显示,三种情况下的二阶固有频率(一阶固有模态为

$$\Phi_{EF-FC} = \frac{FF'}{FC} = \frac{\frac{1}{\sin \beta}}{\frac{h}{\sin \beta}} = \frac{1}{h}. \quad (6)$$

作为 \bar{M}_1 图,其中,斜杆 DE 和 CF 的 M_{DE}, M_{FC} 图由相对线位移 FF', EE' 和杆端的相对转角 $\Phi_{EF-DE}, \Phi_{EF-CE}$ 共同产生。取杆 AB、CD 为隔离体,列挠度和转角方程:

$$\begin{bmatrix} \frac{L_{ED}}{2EI} & -\frac{L_{ED}^2}{4EI} & 0 & 0 \\ -\frac{L_{ED}^2}{4EI} & \frac{L_{ED}}{6EI} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L_{FC}}{EI} & -\frac{L_{FC}^2}{2EI} \\ 0 & 0 & -\frac{L_{FC}^2}{2EI} & \frac{L_{FC}}{3EI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{ED} \\ P_{ED} \\ M_{FC} \\ P_{FC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{h} \\ \frac{1}{\sin \alpha} \\ \frac{1}{h} \\ \frac{1}{\sin \beta} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由于杆 EF 绕其瞬心转动,列相对于瞬心的平衡方程:

$$L_{OF} k_{11} - L_{OE} P_{ED} - M_{ED} - L_{OF} P_{FC} - M_{FC} = 0. \quad (8)$$

解平衡方程,并利用挠度和转角方程所得的结果得:

$$k_{11} = \frac{(6EI + 12EIh)(\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta)}{h^3 \sin \alpha} + \frac{(6EI + 64EIh)(\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta)}{h^3 \sin(\alpha + \beta) \sin \alpha}. \quad (9)$$

将式(3)和(9)同时带入到式(1),可得到三杆结构在纸面内横向振动的自然频率表达式

垂直于纸面的摆动)分别为 137、80 和 58 Hz。所以为保证桁架结构具有较高的刚度,杆的角度应在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 选取。具体的角度值要根据实际结

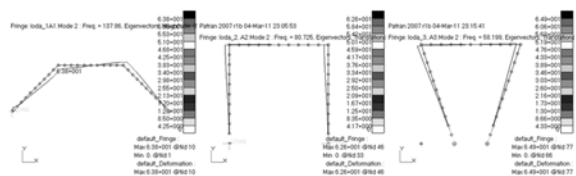


图 2 不同角度的三杆结构模态分析结果
Fig. 2 Modal analysis results of three-strut structure with different angles

构,采用有限元分析与优化设计手段来最终确定。

3.2 桁架结构的基本构型

由于本遥感器的主次镜的镜间隔较大,所以主支撑拟采用双层桁架结构(见图 3),其中前板用来装配次镜组件,中板装配折叠镜组件,后板用来作为整个系统的基础(并用来装配其他光学组件),这样既容易实现传力路径最短,也容易实现力系的封闭。在每一层的桁架结构中,采用多组碳纤维复合材料三杆系组合构成最终的主承力结构。初始设计以最大刚度设计为原则,而为了得到最大刚度,作为组成桁架结构的最基本单位,三杆系中的碳纤维斜杆在不对成像光线产生遮拦,并且在遥感器整体体积允许的情况下,尽量使斜杆的角度接近 45°。通过连接座与相应的后板、中板、前板连接在一起,最终构成桁架的整体结构。由于模态具有方向性,在水平两个方向的刚度设计时,需要同时进行,并且尽量使两个方向结构共用同一根斜杆。

连接座与碳纤斜杆采用胶接的形式,而连接座与基板连接时采用螺钉连接。在系统装配时,需要设计高精度工装,并确保此工装具有良好的温度尺寸稳定性。

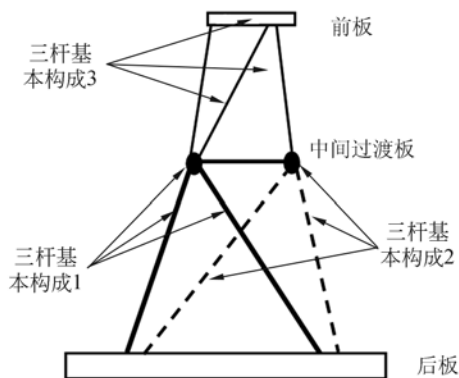


图 3 桁架结构示意图

Fig. 3 Scheme of truss structure

3.3 桁架结构的优化设计

在初始设计中,采用最大刚度原则,即尽可能地增加斜杆的数量(初始结构共设置了 36 根斜杆),以确保得到最大的静态和动态刚度。经有限元分析,初始结构在水平两个方向的固有频率分别为 55 Hz 和 63 Hz。主支撑的优化设计以基本设计为基础,以整机在两个水平方向的一阶模态

为目标函数进行优化。

优化的基本原则为:首先采用灵敏度分析,以桁架中每根斜杆的基本结构参数 h_1, h_2, \dots, h_{36} 的厚度为设计变量,考察每根斜杆对模态贡献的大小,式(11)为灵敏度分析的表达式。通过灵敏度分析,从中优选出对刚度贡献最大的支撑杆的集合,然后对初始结构方案支撑杆的数量进行增减,并修正其作用位置。对两个方向模态影响最大的是上部的 8 根斜杆,因此必须予以保留,而上部的其余 4 根斜杆对模态影响灵敏度较低或为负增益,可以剔除。同样依据灵敏度分析结果对下部的 24 根斜杆进行优选。由于对初始结构中支撑杆的数量进行了合理的剔除,不仅降低了重量,而且为重要支撑杆作用位置的修改提供了改进空间。

$$\begin{cases} \frac{\partial \delta}{\partial h_1} = \frac{\delta(h_1 + \Delta h_1, h_2 \dots h_{36}) - \delta(h_1, h_2 \dots h_{36})}{\Delta h_1} \\ \frac{\partial \delta}{\partial h_2} = \frac{\delta(h_1, h_2 + \Delta h_2 \dots h_{36}) - \delta(h_1, h_2 \dots h_{36})}{\Delta h_2} \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial \delta}{\partial h_{36}} = \frac{\delta(h_1, h_2 \dots h_{36} + \Delta h_{36}) - \delta(h_1, h_2 \dots h_{36})}{\Delta h_{36}} \end{cases} \quad (11)$$

依据灵敏度分析结果,在确定了 24 根支撑杆并对它们的作用位置进行修正后,可以对桁架结构进行进一步参数优化。将对模态影响最大的 24 根斜杆的内径和外径 d_1, d_2 定义为设计变量,约束条件为整机一阶固有频率大于 55 Hz,在此情况下通过优化 d_1, d_2 求得系统的最小重量,优化的目标函数如式(12)所示。经过多次迭代,求得厚度的可选择区。

$$\begin{cases} \mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_{24}] \\ \min PV(\mathbf{h}) \\ \text{s. t. } \text{mod } al(\mathbf{h}) \geq 55 \end{cases} \quad (12)$$

通过参数优化确定了每根杆的内、外径,但为了缩短加工周期和节约成本,依据有限元分析结果,最大程度地对支杆的参数进行归一化处理,此时仍然可以确保较高的动态和静态刚度。

4 有限元分析

经过详细的优化设计后,最终确定主支撑详细的结构形式,依此结构对主支撑结构进行详细

的有限元分析。

4.1 重力作用下次镜端的刚体位移分析

静力学分析主要考察在重力下次镜的刚体位移。主支撑的主要功能就是对光学元件起到支撑作用,所以其静态刚度直接影响到次镜的位置精度。经分析,安装于主支撑结构上的次镜在重力作用下绕水平 X、Y 两个坐标轴的倾角分别为 5" 和 6",线位移分别为 0.035 和 0.043 mm,表明主支撑的静态刚度满足系统成像要求。

4.2 动态稳定性分析

4.2.1 模态分析

模态分析是考察动态刚度的重要指标,由图 4 可知,前三阶振型均发生在整机前框架上,固有频率分别为 58、63 和 82 Hz,桁架结构的基频远高于一般载体的一阶固有频率,满足动态刚度要求。

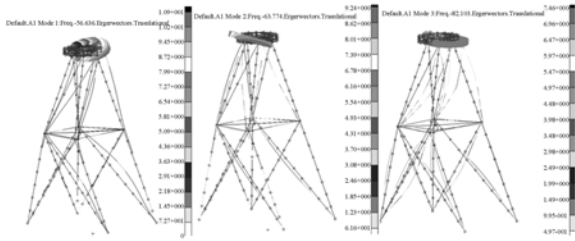


图 4 主支撑结构前 3 阶模态

Fig. 4 The first 3-order modes of main support

4.2.2 振动分析

振动分析主要用来模拟发射过程中主支撑所经历的动力学环境,考察抵抗外界振动干扰的能力。由于斜杆是主要的承力结构,所以必须对每根斜杆的应力进行精确的分析计算,以考察支杆在动态环境下能否破坏。经分析,正弦振动时支撑杆的最大应力为 126.9 MPa,远小于碳纤复合材料的强度极限(800 MPa),说明各支杆不会发生折断破坏。

表 3 正弦振动应力计算结果

Tab. 3 Analysis results of stress in sinusoidal vibration

激振方向	X 向	Y 向	Z 向
最大应力/MPa	118.6	126.9	42.7

5 试验测试

在优化设计完成的情况下,对主支撑进行静态加载测试和动态响应试验,以确定反射镜的最

终状态。

5.1 静态加载试验

静态加载试验是对主支撑静态刚度的最终测试。在前板和后板相应位置粘贴小标准反射镜,作为主支撑结构受力状态下倾角变化的检测依据,标准反射镜指向精度的变化表征次镜的位置精度变化。状态变化主要包括:主支撑从竖直状态变化到水平状态;在中板处安装折叠镜组件;在前板安装次镜组件。每次状态变化后,分别测量标准反射镜指向精度的变化,这些角度的变化量不应超过次镜的成像位置精度要求,否则将最终引起光学系统传递函数的下降。

表 4 给出了初始的主框架竖直状态与最终安装次镜后的状态的对比,测试结果表明次镜在重力方向改变条件下位置精度完全满足成像要求。

表 4 主支撑状态变化前后精度的变化

Tab. 4 Precision changes caused by main support state change

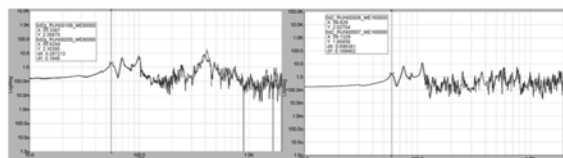
测试结果	竖直 到水平	安装折 叠镜组件	安装折次 镜组件
标准反射镜较上状态 指向精度变化(°)	6.5	0.5	1

5.2 动态测试试验

动态测试主要考察的是正弦振动试验和随机振动试验前后主支撑状态变化。主要包括:

- (1)次镜的加速度响应放大倍率;
- (2)强迫振动前后两个方向模态变化叠加对比,这种模态变化不可太大,否则将意味着主支撑连接环节产生松动或胶层开裂,这将导致成像质量的严重下降;
- (3)强迫振动过程中,需要对主要支杆的应力进行实时监测,考察支杆发生破坏的可能性。

图 5 所示为强迫振动前后模态变化叠加对比,从测试结果可见,振动前后两个方向的模态变

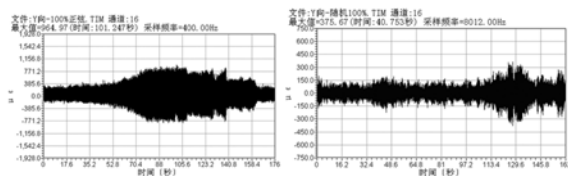


(a) X 向 (b) Y 向
(a)Direction X (b)Direction Y

图 5 振动前后水平方向模态叠加对比

Fig. 5 Mode comparison in horizontal direction

化量均很小。图6所示为振动过程中支撑杆最大应力测试结果,应力测试表明,支杆最大应力发生在正弦振动过程中,最大微应变值为964.97,转变为应力为135 MPa,远远小于碳纤复合材料的强度极限。强迫振动前后标准反射镜指向精度最大变化量为1",说明主支撑的动态稳定性极高,可以保证次镜及折叠镜成像的位置精度的要求。



(a) X向正弦振动 (b) X向随机振动

(a) Sinusoidal vibration in direction X (b) Random vibration in direction X

图6 支撑杆的最大应力测试

Fig. 6 Maximum stress response curves of support bar

参考文献:

- [1] 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):63-70.
ZHANG K K, RUAN N J, FU D Y. Analysis and consideration of development of overseas space off-axis TMA system camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(3):63-70. (in Chinese)
- [2] O'BRIEN T P, ATWOOD B. Adjustable truss for support, optical alignment, and athermalization of a Schmidt camera [J]. *SPIE*, 2003, 4841:403-410.
- [3] STANLEY S, SMELTZER III. Development of bonded joint technology for a rigidizable-inflatable deployable truss [J]. *SPIE*, 2003, 6222:1-11.
- [4] 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.
ZHANG L, JIA X ZH. Design and optimization of trussed supporting structure for off-axis three-mirror reflective space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):603-608. (in Chinese)
- [5] 范斌,王艳. 国外长焦距高分辨率遥感相机桁架结构研究[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(2):35-41.
FAN B, WANG Y. Research on truss structure of foreign remote sensing camera with long focal length and high resolution [J]. *Spacecraft Recovery &*

6 结论

本文针对某长焦距 TMA 空间光学遥感器的主支撑进行了详细的结构设计、仿真分析和试验验证。通过对长焦距空间光学遥感器主支撑结构构型分析、材料选取、实施方案等方面的综合考虑,利用有限元分析技术、模态分析理论、结构优化设计理论设计了一种 24 杆组成的桁架支撑结构。试验测试结果表明,该主支撑结构在静态加载条件下满足次镜组件指向精度小于 10"的静态刚度要求;主支撑结构的一阶固有频率为 55 Hz,正弦振动激励下各支杆最大应力为 135 MPa,满足系统动态稳定性要求。本文所采用的遥感器主支撑设计方法也可为其他长焦距大规模遥感器的主支撑结构设计提供参考和借鉴。

Remote Sensing, 2008, 29(2):35-41. (in Chinese)

- [6] 李威,刘宏伟,郭权峰. 空间相机主次镜间的薄壁筒和支杆组合支撑结构[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12):2633-2641.
LI W, LIU H W, GUO Q F. Combined supporting structure of thin wall joint cylinder and supporting bar between primary mirror and second mirror in space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12):2633-2641. (in Chinese)
- [7] 张雷,金光. 同轴轻型空间遥感器支撑桁架的设计与试验[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5):1099-1104.
ZHANG L, JIN G. Design and test of supporting truss for light space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5):1099-1104. (in Chinese)
- [8] 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.
ZHANG L, JIN G. 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)
- [9] 杨近松. 空间相机桁架模态相关性分析[J]. 计算机仿真, 2006, 23(1):274-276.
YANG J S. Model correlation analysis of frame structure of a space camera [J]. *Comp. Simul.*, 2006, 23(1):274-276. (in Chinese)
- [10] 林再文,刘永琪,梁岩. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用[J]. 光学精密工程, 2007,

15(8):1181-1185.

LIN Z W, LIU Y Q, LIANG Y. Application of carbon fibre reinforced composite to space optical structure[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(8): 1181-1185. (in Chinese)

- [11] 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.

LI W, LIU H W. Structure stability of precision component made of carbon fiber composite in space

optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11):2173-2179. (in Chinese)

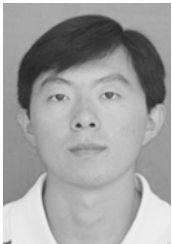
- [12] 王永宪,王兵,任建岳. 空间相机碳纤维支撑结构改进及拓扑优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(4):702-704.

WANG Y X, WANG B, REN J Y. Improvement of carbon fiber support structure and topology optimization design for space camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009,38(4):702-704. (in Chinese)

作者简介:



辛宏伟(1970—),男,吉林长春人,博士,研究员,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感器 CAD/CAE 及光机结构优化设计方面的研究。E-mail: xinhwciomp@sina.com



柴方茂(1982—),男,吉林通化人,助理研究员,2008年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事空间光学遥感器结构技术及精密机械方面的研究。E-mail: fangmaochai@gmail.com

通讯作者:



关英俊(1978—),男,满族,吉林永吉人,副教授,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感器 CAD/CAE 与结构优化设计方面的研究。E-mail: gyj5460@sohu.com

● 下期预告

LED 道路照明的配光优化设计

王 尧¹,刘 华¹,荆 雷^{1,2},卢振武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 研究生院,北京 130039)

针对 LED 路灯配光设计合理化的需求,本文从道路照明评价指标出发,进行了 LED 道路照明的配光优化设计。综合考虑照度分布与道路照明评价指标之间的函数关系,建立 LED 路灯照度分布的数学模型。以照明评价指标为优化条件,亮度—照度比 Q 为优化目标,求解有约束的最优化问题,得到配光曲线。以沥青路面主干路为例,把得到的配光曲线导入照明模拟软件中进行仿真模拟。配光优化结果表明:在 $C=90^\circ$ 平面和 $C=270^\circ$ 平面的配光曲线呈非对称分布,且最大光强偏向机动车道方向,比传统的对称式配光曲线节能 30.3%。 Q 为 0.0727,高于一般沥青路面的比值,同时各项照明评价指标均符合 CJJ 45-2006 的要求,配光性能良好。