

文章编号 1004-924X(2019)08-1783-10

机载光谱仪高模态主支撑结构优化

李 颐^{1,2}, 刘 伟^{1*}, 张晓辉¹, 颜昌翔^{1,3}, 顾志远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 100039;

3. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100039)

摘要:为满足机载光谱仪主支撑结构动力学特性好、质量低等需求,本文进行了主支撑结构的优化设计及试验验证。首先,针对常用结构无法适用于本系统的问题,提出了一种框架式与薄壁筒式结构相结合的总体结构形式,方便对遮光罩与结构进行一体化设计,可有效降低质量且保证刚度;其次,为提高系统模态,采用多变量集成优化方法,在满足质量要求的情况下将其模态由 127 Hz 提高到 156 Hz,使其具有良好的动力学特性;然后,为确定振动环境对系统调制传递函数(MTF)的影响,通过有限元分析与灵敏度矩阵相结合的方法分析了振动环境对系统 MTF 影响,并通过计算得知本结构能适用于像元尺寸大于 10 μm 的机载系统;最后,通过对主支撑结构的测振试验与整机结构的波前检测试验,验证了本文设计方法与分析过程的有效性与可行性。本文提出的优化设计方法可为机载遥感仪器结构的优化设计提供参考,将有助于推动机载遥感仪器结构设计技术的发展。

关键词:机载光谱仪;主支撑结构;集成优化;振动环境;调制传递函数

中图分类号:TH703;TH744 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192708.1783

Optimized design of high-mode main support structure for airborne spectrometer

LI Yi^{1,2}, LIU Wei^{1*}, ZHANG Xiao-hui¹, YAN Chang-xiang^{1,3}, GU Zhi-yuan¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Center for Materials Science and Optoelectronics Engineering,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

*Corresponding author, E-mail: liuwei@ciomp.ac.cn

Abstract: To meet the requirements of high dynamic characteristics and overcome the low quality of the main support structure, an optimized design was devised and test verification of the main support structure was conducted. First, to solve the problem that classic support structures could not be applied to this system, a general structural form combining a frame-type structure and a thin-walled tubular structure was proposed. This form conveniently integrates the hood and structure to improve

收稿日期:2019-04-04;修订日期:2019-05-07.

基金项目:国家自然科学基金重大科研仪器研制项目资助(No. 61627819, No. 61727818);国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFF0103603)

quality and ensure rigidity. Second, multi-variable integration optimization was adopted to improve the first-order mode from 127 to 156 Hz when the quality requirement was also met, thereby effectively improving the dynamic characteristics. Thereafter, to determine the influence of the vibration environment on the system MTF, the influence of the vibration environment on the system MTF was analyzed by combining finite element analysis and a sensitivity matrix. The scope of application demonstrates that the structure could be applied to an airborne system with a pixel size of $>10\ \mu\text{m}$. Finally, the effectiveness and feasibility of the design method and analysis process were verified by a vibration test and a wavefront aberration detection test. The optimized design method proposed in this paper can provide reference for the optimized design of airborne remote sensing instrument structures. This paper will contribute to the development of structure design techniques for airborne remote sensing instruments.

Key words: airborne spectrometer; main supporting structure; integrated optimization; vibration environment; Modulation Transfer Function(MTF)

1 引言

高光谱遥感兴起于 20 世纪 80 年代,是遥感技术发展的主要成就之一,作为当前遥感的前沿技术,已被应用于地质勘查、海洋研究、农业生产等诸多领域^[1-5]。机载光谱仪相比于空间光谱仪,具有成本低、使用方便、机动性能好等优点。目前国外的机载光谱仪已经得到成熟应用,如美国的 AVIRIS,澳大利亚的 HyMap,加拿大的 CASI, SASI, TABI 等^[6],国内的中科院上海技术物理研究所、长春光机所等也都进行了相关领域的研究^[7-8]。

机载光谱仪的主支撑结构作为整机结构中支撑光学系统的关键部件,它的性能将直接影响整个系统的性能,因此对其进行的设计工作尤为重要。主框架在设计时需要在质量低的同时保证刚度与强度,并具有良好的动力学特性,以满足仪器在复杂机载环境中的成像要求。

目前光学仪器常用的主结构形式一般可分为框架式结构、薄壁筒式结构和桁架式结构三种^[9-13]。框架式结构和薄壁筒式结构一般采用金属铸造成型,在中、小型光机结构中应用较为广泛,主要优点是结构稳定、技术成熟、工艺性好;而桁架式结构与前者相比有更好的比刚度、质量较小,但装配难度高,多应用在大口径、长焦距的大型光学系统上,如哈勃天文望远镜等。本机载光谱仪光学系统口径较小,整体尺寸不大,属于小型光谱仪,而框架式结构因整机内部元件较多,部分有效传力路径被光路与元件阻挡,动力学特性难以提升;而薄壁筒结构为满足装调要求需拆分为

上下两体且筒内增加板形安装结构,质量冗余高,这两种结构难以直接应用于本系统中。

针对系统对于主支撑结构质量低、动力学特性好等需求,本文完成了主支撑结构的优化设计:首先,根据系统零件分布与安装要求,设计了一种框架结构与薄壁筒结构相结合的形式,该结构将遮光罩与薄壁筒进行一体化设计,在降低质量的同时节约空间,可设计性强;其次,采用多变量集成优化的方法对结构关键位置进行了参数化设计,使结构在质量满足要求的情况下具有良好的动力学特性;然后,通过有限元分析与灵敏度矩阵法分析了振动环境对系统 MTF (Modulation Transfer Function)的影响,并以此为基础分析了框架结构的适用范围;最后,对结构进行了试验,验证了本设计方法合理性与可行性。

2 结构与优化

主框架作为整机结构与各镜体的支撑主体,且为整机质量最大的部分,它的力学特性将直接影响整机系统的成像性能。本仪器处于机舱外,振动环境更加恶劣,因此为避免发生共振引起结构的损坏与疲劳破坏,保证仪器的正常工作,框架基频需大于 150 Hz,质量需小于 15 kg。当单独使用传统框架式结构与薄壁筒结构难以满足要求。本文提出一种框架式结构与薄壁筒结构相结合的结构形式,将遮光罩与薄壁筒进行一体化设计,在降低质量的同时节约空间;利用多变量集成优化的方法有效提高系统基频,以保证其具有良好的力学特性。

2.1 材料选择

由于本机载摆扫式光谱仪的使用环境复杂恶劣,在刚度满足要求的同时对重量有一定限制,因此,在结构设计时,在考虑结构在质量轻的同时,

具有足够的强度与环境适应性。通过镜体与框架材料匹配,能有效提高光机系统的热力环境适应能力^[14-15]。典型金属反射镜材料性能对比如表 1 所示。

表 1 材料属性
Tab. 1 Properties of materials

材料名称	密度 ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量 E /GPa	比刚度 E/ρ /($10^9 \text{ N} \cdot \text{mm} \cdot \text{g}^{-1}$)	热导率 K /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$)	线膨胀系数 α /($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
铝合金	2.8	71	2.54	142	23.6
铟钢(4J32)	8.1	141	1.74	13.9	0.3~1.0
钢(45)	7.81	200	2.56	48.1	11.59
钛合金(TC4)	4.44	109	2.45	7.4	9.1

铝合金不仅可作为良好的高比刚度结构材料,还常作为光学反射镜材料,因其具有易于加工、成本低等优点,被广泛应用与各类机械结构与光学镜片中,因此为保证仪器不受温度变化的影响,机载光谱仪的光学系统与结构件均选用铝合金材料。

2.2 初始结构设计

空间相机的主结构形式一般可分为框架式结构、薄壁筒式结构和桁架式结构 3 种^[9-13]。本机载光谱仪光学系统口径较小,整体尺寸不大,属于小型光谱仪,主结构可采用框架式或薄壁筒式结构。

国内与本文相似的仪器,当采用框架式结构、薄壁筒式结构和桁架式结构时基频约为 100 Hz^[7-9],与本系统要求相差较多,而且在进行结构设计时发现,框架式结构因整机内部元件较多,部分有效传力路径被光路与元件阻挡,动力学特性难以提升;而薄壁筒结构为满足装调要求需设计为上下两体,且筒内需增加板形安装结构,质量冗余高,装调难度大,这两种结构难以直接应用与本结构中。因此初始结构采用框架式结构与薄壁筒式结构相结合的结构形式,并将遮光罩与薄壁筒进行一体化设计,在降低质量的同时保持系统的力学稳定性,初始结构如图 2 所示。

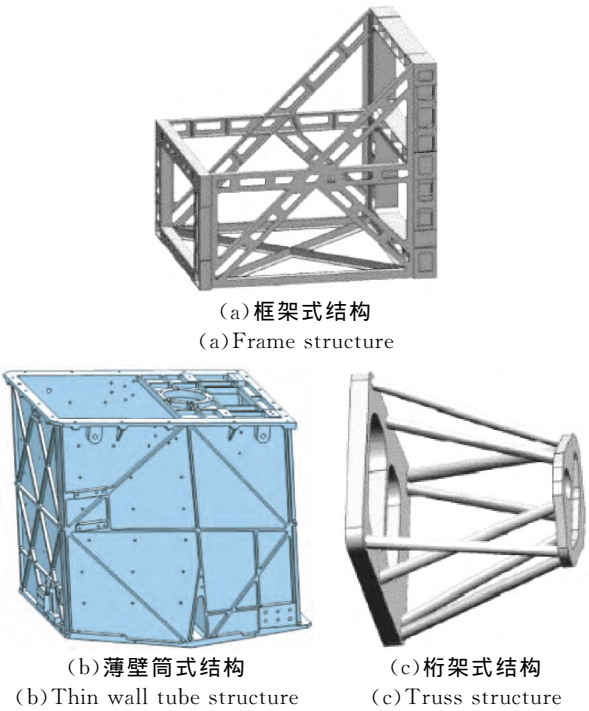


图 1 光机系统常用主支撑结构形式
Fig. 1 Classic support structures form of opto-mechanical system

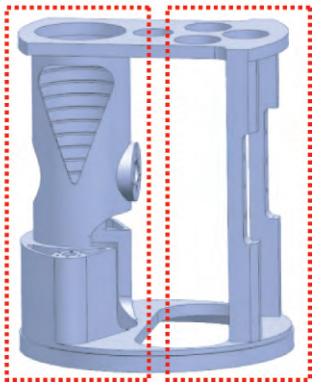


图 2 初始结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of original structure

经有限元分析发现,此时框架质量为 12.5 kg,基频为 127 Hz,第二阶频率为 146 Hz,低于要求的 150 Hz,频率低于要求的所有振型如图 3 所示,通过观察振型可以发现:该结构侧向刚度较差,需要通过后续优化以提高结构刚度。

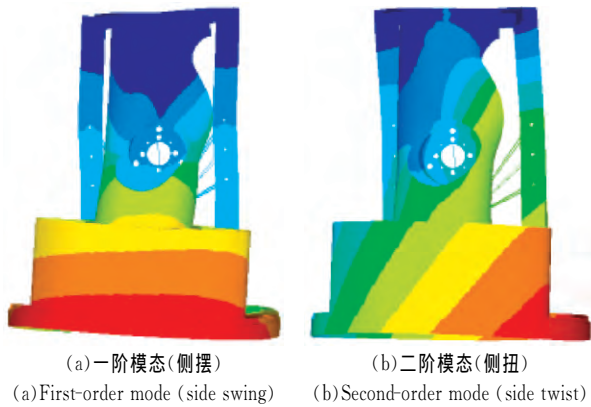


图 3 模态分析示意图

Fig. 3 Schematic diagram of modal analysis

2.3 多变量集成优化

系统模态可通过结构的无阻尼振动方程得到:

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

其中: $[K]$ 为结构的刚度矩阵, $[M]$ 为结构的质量矩阵, 均与系统结构形式及结构尺寸有关, 其特征方程根据式(1)可得:

$$|[K] - f_i^2[M]| = 0. \quad (2)$$

通过对式(2)的求解即可得到系统的模态频率 f_i , 其中最小值即为系统基频。

对初始结构模态振型进行分析可知, 为使结构模态增加, 可以通过增加筒壁厚度提高结构刚度、减轻底部多余质量、等手段提高结构侧向刚度。对上述变量进行优化时发现, 优化可行域内并无有效解, 因此首先通过增加加强筋的方式提高系统侧向刚度, 在初始结构两侧各设置一矩形加强筋, 此时一阶模态频率函数为关于加强筋位置的函数, 可表示为:

$$MODE = f(x_i, y_i). \quad (3)$$

位置优化过程如式(4)所示:

$$\begin{cases} \max & MODE = f(x_i, y_i) \\ \text{s. t.} & x_i \in (N_{x1}, N_{x2}), y_i \in (N_{x1}, N_{x2}), i=2 \end{cases} \quad (4)$$

公式(4)表示加强筋的上下节点 x_i, y_i 坐标在设定区域内选择, 其有限元节点编号为 N_i , 优化目标为一阶模态频率最大, 优化结果如图 4(a)所示, 设计结果如图 4(b)所示。

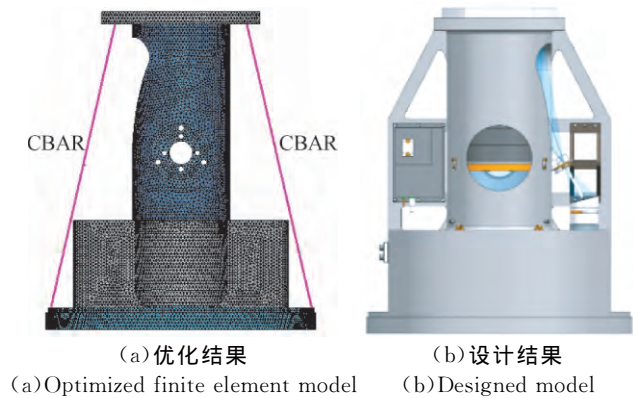


图 4 加强筋位置优化结果

Fig. 4 Rib position optimization result

增加加强筋后, 结构质量为 14.27 kg, 基频为 143 Hz, 仍未满足要求的 150 Hz。由于筋的尺寸与筒壁厚度仍有优化空间, 常用的优化方法是: 通过有限元分析各个位置的受力情况, 根据分析结果对主要受力的筋及壁进行加厚^[13], 该方法需要重复多次计算, 不能定量计算筋以及壁的尺寸, 结构仍有提升空间。为使主支撑结构在质量满足要求的前提下, 基频提高至最优, 根据筋位置将筋截面尺寸分组, 将筋的矩形截面尺寸 a_i, b_i 、筒壁厚度 T_1 与底面厚度 T_2 设为 14 个独立的变量, 极大地扩展了设计空间, 分组示意图如图 5 所示。通过结合 Isight 软件中的 Optimization 模块与有限元分析软件 Optistruct, 并采用多岛遗传算法^[16] (Multi-island Genetic Algorithm, MIGA) 进行多变量集成优化。此时模态频率函数为关于加强筋截面尺寸的函数, 可表示为:

$$MODE = f(a_i, b_i, T_k), \quad (5)$$

其中: a_i, b_i 分别为矩形筋截面的长和宽, T_k 为筒壁与底面厚度。优化问题的数学描述为:

$$\begin{cases} \max & MODE = f(a_j, b_j, T_k) \\ \text{s. t.} & a_1 \in (10, 50), b_1 \in (10, 40) \\ & a_j \in (5, 25), b_j \in (5, 25), j=2, 3 \\ & a_j \in (5, 50), b_j = b_{j+1} \in (5, 50), j=4, 5, 6. \\ & T_1 \in (5, 15), T_2 \in (15, 25) \\ & mass < 15 \text{ kg} \\ & d_1 \sim d_4 < 10 \text{ } \mu\text{m} \end{cases} \quad (6)$$

其中: T_1, T_2 分别为筒壁与底面厚度, $d_1 \sim d_4$ 分别为 4 面镜面的位置变化。

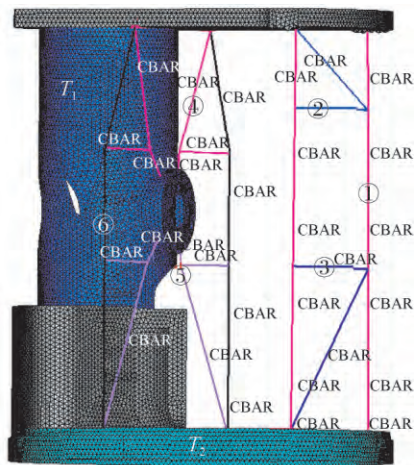


图 5 变量分组示意图

Fig. 5 Schematic diagram of each group of variables

优化过程中需保证各个筋既不遮挡光路,也不与其他元件相互干涉,并考虑后续加工工艺性,设置各个变量的可行域,优化约束为质量小于 15 kg,优化目标为基频最大,最终在可行域中获得最优解,结果如表 2 所示。

表 2 各变量优化结果

Tab. 2 Variable optimization results

变量	优化前	优化后(已圆整)
$a_1, b_1/\text{mm}$	50, 50	43, 35
$a_2, b_2/\text{mm}$	15, 15	12, 20
$a_3, b_3/\text{mm}$	15, 15	8, 15
$a_4, b_4/\text{mm}$	15, 15	12, 10
$a_5, b_5/\text{mm}$	15, 15	8, 10
$a_6, b_6/\text{mm}$	15, 15	18, 10
T_1/mm	6	12
T_2/mm	20	15
质量/kg	14. 27	14. 92
基频/Hz	143	156

经过多变量集成优化后的结构质量为 14. 92 kg,前三阶模态频率分别为 156 Hz, 197 Hz 和 261 Hz,说明关键部位的尺寸对结构的模态频率影响较大,对其进行的多变量集成优化对提高主支撑结构的动态性能具有重要意义。

3 振动环境对 MTF 的影响分析

当仪器处于机载平台复杂动力学环境中,不但会发生共振引起结构的损坏与疲劳破坏,还会引起仪器光学镜面发生晃动,导致像点与焦面相对位置发生变化,该变化会造成系统调制传递函数(MTF)下降,从而影响像质^[17-19],因此为保证仪器的正常工作,在结构设计过程中除了需要保证系统基频满足要求避免共振外,还需要通过仿真计算振动环境对 MTF 的影响。目前常用的方法是根据系统对 MTF 的要求分配各个镜面的位移量、振幅等参数,在工况下上述参数满足要求即可保证系统 MTF 满足要求,这些参数最终均回归于系统的 MTF。本文中直接对系统 MTF 进行计算与验证,不仅能省去中间的计算步骤,还能降低指标分配的难度与余量,拓展结构的设计空间,对光机结构的设计具有工程意义。通过数值验证仪器成像性能不受恶劣的工作环境的影响。

3.1 镜面位置变化的灵敏度矩阵

通过装调中常用的灵敏度矩阵法^[20-22]即可求出各镜面因振动对像点振幅产生的影响。在光学系统失调状态下,像点偏移量 $D(N)$ 相对于各镜面 n 个自由度失调量的一阶泰勒展开式可以表示为:

$$D(N + \Delta M) = D(N) + \left(\sum_{q=1}^n \Delta m_q \frac{\partial}{\partial x_q} \right) D(N) + R_{N,1}(\Delta M) \approx D(N) + \sum_{q=1}^n \Delta m_q \frac{\partial D(N)}{\partial x_q}, \quad (7)$$

其中: $N=(x_{01}, x_{02}, \cdots, x_{0n})$ 为光学系统各镜面 n 个自由度的设计状态; $\Delta M=(\Delta m_{01}, \Delta m_{02}, \cdots, \Delta m_{0n})$ 为各镜面 n 个装调自由度上的振幅; $R_{N,1}(\Delta M)$ 为高阶余项。

将式(7)表示为矩阵形式:

$$D(N + \Delta M) = \begin{bmatrix} D_x(N) \\ D_y(N) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial D_x(N)}{\partial x_1} & \frac{\partial D_x(N)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial D_x(N)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial D_y(N)}{\partial x_1} & \frac{\partial D_y(N)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial D_y(N)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_1 \\ \vdots \\ \Delta m_1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

由各镜面振动产生的像点振幅即为:

$$d = d_x^2 + d_y^2, \quad (9)$$

其中：

$$d_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial D_x(N)}{\partial x_1} & \frac{\partial D_x(N)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial D_x(N)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_1 \\ \vdots \\ \Delta m_1 \end{bmatrix},$$
$$d_y = \begin{bmatrix} \frac{\partial D_y(N)}{\partial x_1} & \frac{\partial D_y(N)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial D_y(N)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_1 \\ \vdots \\ \Delta m_1 \end{bmatrix}.$$

(10)

式(10)中,各镜面自由度的灵敏度系数即为像点位置对各个自由度的偏导数组成的矩阵,在振动的某一时刻内,像点位置与镜面位置的偏移量可近似为线性关系,通过光线追迹法^[23]计算得到表 3 所示的各自由度的灵敏度系数。

表 3 各镜面位移量的灵敏度系数

Tab. 3 Sensitivity coefficient of each mirror offset

	位移量系数			角度系数/ μm		
	Δx	Δy	Δz	θx	θy	θz
三面摆镜	0,0	0,0	0,0	-1.2,0	0,-1.2	0.6,0.6
反射镜	0,0	0,0	0,0	1.2,0	0,1.4	0.6,0.7
主镜	-0.6,0	0,-0.6	0.3,0	-1.2,0	0,-1.3	-0.6,0.7
次镜	0.6,0	0,0.6	0,-0.3	-0.4,0	0,-0.3	-0.2,-0.2

3.2 振动环境对系统 MTF 的影响仿真

在各个镜面的位置与像点振幅的关系确定后,需要计算机载平台动力学环境所引起的元件振动,并确定该振动对系统 MTF 的影响。分别对整机输入 GJB150.16 中一种典型固定翼飞机的振动谱^[24],谱形如图 6 所示,计算各个镜面因振动而引起的位置变化列于表 4。

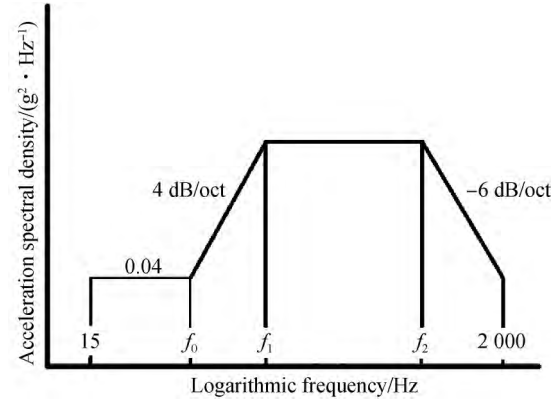


图 6 一种典型固定翼飞机的振动谱
Fig. 6 Vibration spectrum of a typical fixed wing aircraft

表 4 振动条件下各镜面的位置变化

Tab. 4 Offset of each mirror under vibration

	$\Delta x/\mu\text{m}$	$\Delta y/\mu\text{m}$	$\Delta z/\mu\text{m}$	$\theta x/(\text{''})$	$\theta y/(\text{''})$	$\theta z/(\text{''})$
三面摆镜	2.3	1.8	0.2	0.7	1.5	0.2
反射镜	1.3	1.9	0.2	0.9	0.7	0.3
主镜	0.2	0.1	0	0.2	0.1	0
次镜	2.0	1.3	0.4	0.4	1.1	0.5

将表 4 所示的计算结果与表 3 中的灵敏度系数代入至式(9)、式(10)中得到:因机载平台振动引起的像点振动幅度仅为 1.21 μm ,由于系统基频较高,结构受低频振动影响小,可视为像点在积分时间内做高频正弦振动,即振动周期小于积分时间,通过像点振幅可直接计算系统传递函数 MTF:

$$MTF_{\sin}(f) = \left| \frac{1}{\pi} \int_{-D}^D \frac{\exp(-2i\pi fx)}{\sqrt{D^2 - x^2}} dx \right|,$$

(11)

其中: f 为探测器的 Nyquist 频率, $f = \frac{1}{2a}$, a 为线阵探测器的像元尺寸, $a = 0.25 \text{ mm}$, D 为像点的振幅。由式(11)可知,MTF 函数为关于探测器的 Nyquist 频率 f 以及振幅 D 的单调减函数,当探测器像元尺寸确定后,MTF 与振幅的关系曲线如图 7 所示。

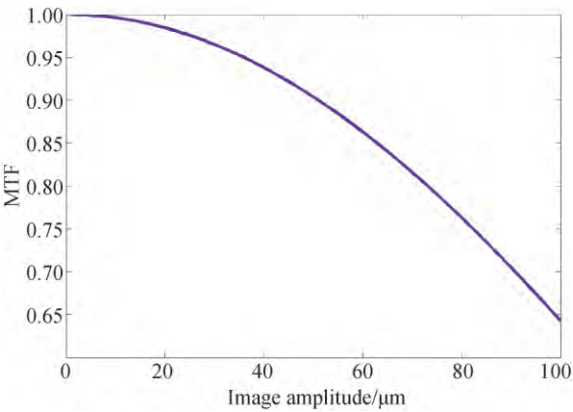


图 7 系统传递函数与像点振幅关系
Fig. 7 Relationship between the MTF and the image amplitude

由图 7 可知,在像元尺寸确定时,MTF 为关于振幅 D 的单调减函数,振幅越大,MTF 下降也越明显,为使航空相机具有较高的调制传递函数,

必须使像面上像点位移量控制在一定的范围内。根据要求确定此部分 $MTF \geq 0.93$, 代入公式可得到, 像点位移量需要满足:

$$D \leq 42.6 \mu\text{m}. \quad (12)$$

像点振动幅度仅为 $1.21 \mu\text{m}$, 远小于要求的 $42.6 \mu\text{m}$, 此时 $MTF \approx 1$, 机载平台振动环境对系统传递函数几乎不产生影响, 满足工况下的设计要求。

MTF 除与像点振幅有关外, 还与探测器的像元尺寸有关, 为提高信噪比, 并考虑到仪器摆扫成像方式, 仪器采用大像元线阵探测器, 尺寸为 $0.25 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$, 因此振动对仪器信噪比影响较小。但当像元尺寸较小时, MTF 受振动影响较为严重, 因此分析了当像点振动幅度为 $1.21 \mu\text{m}$ 时像元尺寸 a 对系统 MTF 的影响, 其关系曲线如图 8 所示。

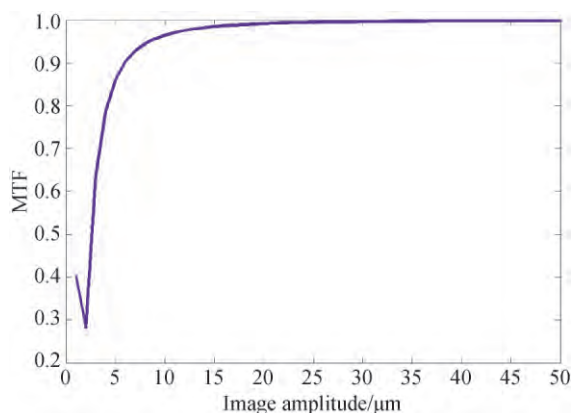


图 8 系统传递函数与像元尺寸关系

Fig. 8 Relationship between the MTF and the pixel length

常见的线阵相机象元大小 $5, 7, 10$ 和 $14 \mu\text{m}$ 几种, 由图 8 可知, 当像元尺寸大于 $15 \mu\text{m}$ 时, 系统 $MTF > 0.99$, 几乎不受影响, 当像元尺寸大于 $10 \mu\text{m}$ 时, 系统传递函数即可达到 0.93 , 因此本文提出的主支撑结构能适用于像元尺寸大于 $10 \mu\text{m}$ 的系统中。

综上所述, 主支撑结构具有设计紧凑、刚度高、环境适应性强等优点, 能满足航空光谱遥感的应用需求。该设计方法可为光机系统的主支撑结构的设计提供参考。

4 试验验证

试验验证主要包括激光测振试验与波前检测

试验, 通过激光测振试验可以检验主支撑结构设计 with 优化过程的正确性, 通过系统波前检测可以验证整机系统的成像性能, 从而说明结构的静态刚度满足仪器使用要求。

4.1 激光测振试验

激光测振是利用基于光学多普勒效应的激光动态干涉仪进行测振的非接触式测量技术, 该技术相较传统的接触式测量具有响应频带宽、速度分辨率高、测量时间短、测量精度高以及可实现远距离测量等优点^[25]。其主要原理是利用多普勒效应对被测物体表面反射光与出射光的频率差进行检测, 从而计算出被测物体的振动特性^[26]。当发光点与探测器之间存在相对运动时, 探测器接收光的波长和频率会发生变化, 当振动方向与光传播方向相同时, 有如下关系:

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda}, \quad (13)$$

其中: v 为发光点与探测器的相对速度, λ 为光波长, Δf 为多普勒频率变化。

当振动方向与光传播方向存在夹角 θ 时:

$$\Delta f = \frac{2v \cos \theta}{\lambda}. \quad (14)$$

常见的激光测振仪原理图如图 9 所示, 首先从激光器发射出相干光束, 经分束器分光后分为本征光与测量光, 测量光聚焦光路后, 聚焦与测振目标上, 测量光经由测振目标的振动而发生多普勒频率变化携带目标振动信息后, 经被测目标表面反射回系统内, 再与本征光经合束器混频后被探测器接收。

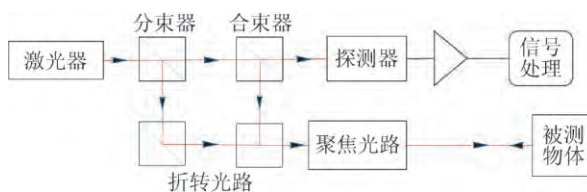


图 9 激光测振仪原理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of laser vibration meter

由式(10)可得多普勒频率变化与被测物体反射面振动速度 V_t 之间的关系为:

$$\Delta f = 2\pi \cdot \frac{2V_t \cos \theta}{\lambda}. \quad (15)$$

通过数字信号处理等手段将探测器输出信号进行处理便可以得到多普勒频率变化 Δf 的值, 由此便计算出被测物体的振动速度与位移信息。

测振试验实物图如图 10 所示。测振系统由激光测振仪、主框架、计算机组成,其中激光测振仪是德国 Polytec PSV-500 型号激光测振仪,测量频率范围为 $0 \sim 50$ kHz,速度分辨率为 $0.04 \sim 0.5 \mu\text{m}/\text{Hz}$,位移分辨率为 0.3 nm ,该性能足以满足测振试验。



图 10 激光测振试验

Fig. 10 Laser vibration test

测振前,将框架固定于硬质平台上,调整激光测振仪指向位置与角度,确保激光照射在被测物体上合理的振动拾取点,并调整采样参数。测振时使用橡胶锤敲击作为振动激励,通过敲击被测物体产生振动,通过计算机读取仪器测量数据,振动曲线分别如图 11 所示。

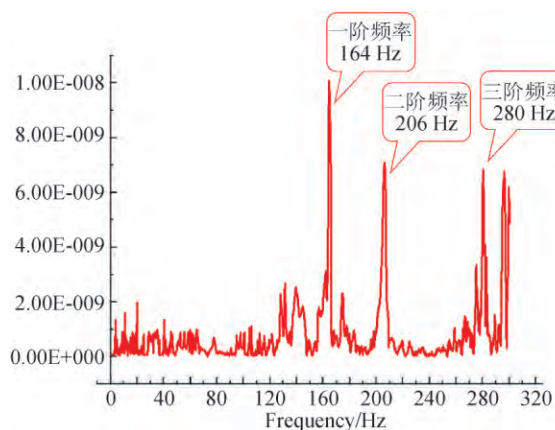


图 11 振动特性曲线

Fig. 11 Vibration characteristic curve

由振动曲线可以看出,主框架基频为 164 Hz ,第二阶模态频率为 206 Hz 、第三阶模态频率为 280 Hz ,说明主框架动力学特性较好,可以满足工况下的使用要求,分析结果相差小于 10% ,根据工程实践经验处于规定的范围内。验证了主框架设计、分析与计算的合理性。

4.2 波前检测试验

为方便仪器装调,在装调不同镜面的过程中

需要变化仪器方向,所以仪器在装调过程中所受重力方向不同,装调后对系统进行波前检测试验以验证主支撑结构具有足够刚度适应重力环境,并保证整机成像性能满足要求。试验原理图如图 12 所示。整机左侧放置激光干涉仪,右侧为标准平面反射镜。通过调整平面反射镜角度,使干涉仪出射光经光学系统后再原路返回,以形成干涉图样。最终波前像差检测结果如图 13 所示。由于本系统为点成像系统,系统波前 RMS 值小于 $\lambda/8$ 即可满足使用要求,结果证明整机系统波前满足使用要求,说明主支撑结构在方向改变后镜面位置所受影响较小,刚度能满足系统使用要求。

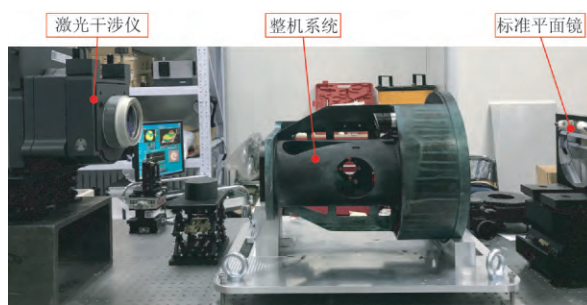


图 12 波前检测试验图

Fig. 12 Schematic of wavefront detection test

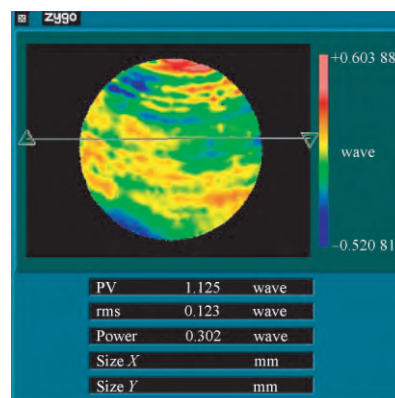


图 13 波前检测结果

Fig. 13 Result of wavefront detection test

5 结 论

为了满足主支撑结构质量低、动力学环境强等需求,进行了主支撑结构的优化设计:采用框架式与薄壁筒式结构相结合的设计方式,将遮光罩与薄壁筒进行一体化设计,在降低质量的同时节约空间,可设计性强,可应用于离轴系统的主支撑结构设计;利用多变量集成优化方法对主支撑结

构进行详细设计,利用多变量集成优化方法对主支撑结构进行详细的参数化设计,能在设计域内提高结构性能,最终通过试验测得主框架基频为164 Hz;通过灵敏度矩阵法分析了镜面六自由度位置变化对像点偏移量的影响特性,结合振动环境有限元仿真方法,验证了主支撑结构在复杂机载平台振动环境下的像点振动幅度为 $1.21\ \mu\text{m}$,通过理论计算的方法证明了机载平台振动环境对

系统MTF几乎不产生影响;同时分析了本结构的适用范围,结果表明该结构能适用于像元尺寸大于 $10\ \mu\text{m}$ 的机载系统;该方法可直接对系统MTF进行仿真计算,能降低指标分配过程中的余量,提高优化空间;最终通过试验测试了系统波前像差,说明主框架结构设计能满足航空光谱遥感的应用需求,该优化设计方法可为国内机载遥感仪器结构的高模态设计技术提供参考。

参考文献:

- [1] 曹佃生,石振华,林冠宇. 机载海洋改进型Dyson高光谱成像仪的研制[J]. 光学精密工程, 2017, 25(6): 1403-1409.
CAO D SH, SHI ZH H, LIN G Y. Development of airborne ocean modified Dyson hyperspectral imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6): 1403-1409. (in Chinese)
- [2] 周阳,杨宏海,刘勇,等. 高光谱成像技术的应用与发展[J]. 宇航计测技术, 2017, 37(4): 25-29.
ZHOU Y, YANG H H, LIU Y, et al.. Application and development of hyperspectral imaging technology [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2017, 37(4): 25-29. (in Chinese)
- [3] 于丰华. 基于无人机高光谱遥感的东北梗稻生长信息反演建模研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2017.
YU F H. *Retrieving Nutrient Information of Japonica Rice Based on Unmanned Aerial Vehicle Hyperspectral Remote Sensing* [D]. Shenyang: Information and Electrical Engineering. 2017. (in Chinese)
- [4] 张军强,邵建兵,颜昌翔,等. 成像光谱仪星上光谱定标的数据处理[J]. 中国光学, 2011, 4(2): 175-181.
ZHANG J Q, SHAO J B, YAN C X, et al.. Data processing of on-orbit spectral calibration of spaceborne high resolution imaging spectrometer [J]. *Chinese Optic*, 2011, 4(2): 175-181. (in Chinese)
- [5] 孙德贝,李志刚,李福田. 用于太阳光谱仪的光电探测系统线性度测试装置[J]. 中国光学, 2019, 12(2): 294-301.
SUN D B, LI Z G, LI F T. Linearity testing device for the photoelectric detecting system of solar spectrometers [J]. *Chinese Optic*, 2019, 12(2): 294-301. (in Chinese)
- [6] GREEN R O, EASTWOOD M L, SARTURE C M, et al.. Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(98): 227-248.
- [7] 姜博. 大惯量高精度扫描控制及同步像移补偿技术的研究[D]. 上海:中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
JIANG B. *The Research of Large Inertia and High Precision Scanning Control and Synchronal Image Motion Compensation Technology* [D]. Shanghai: Chinese Academy of Science Shanghai Institute of Technical Physics, 2014. (in Chinese)
- [8] 陈伟,郑玉权,薛庆生. 机载宽视场大相对孔径成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 15-21.
CHEN W, ZHENG Y Q, XUE Q SH. Airborne imaging spectrometer with wide field of view and large relative-aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 15-21. (in Chinese)
- [9] 薛闯,颜昌翔. 空间相机主支撑结构设计与分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(35): 8894-8897.
XUE C, YAN CH X. Design and analysis of space camera main support structure [J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(35): 8894-8897. (in Chinese)
- [10] 王彩琴,徐彭梅. 某空间光谱仪高稳定性光机结构设计[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(5): 147-150.
WANG C Q, XU P M. High opto-mechanical stability design of space spectrometer [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(5): 147-150. (in Chinese)
- [11] 胡庆龙. 摆扫式天基红外成像系统光机结构设计及其像移补偿技术研究[D]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
HU Q L. *Optical and Mechanical Structure Design and Research on Image Motion Compensation Technology of Whisking Broom Space-Based Infrared Imaging System* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, 2018. (in Chinese)
- [12] 卢晓明,贾建军,周成林,等. 空间望远镜主次镜支撑筒结构优化设计[J]. 天津工业大学学报, 2018, 37(4): 84-88.
LU X M, JIA J J, ZHOU CH L, et al.. Optimization design of primary and secondary mirror sup-

- porting tube for space telescope [J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2018, 37(4): 84-88. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 张东阁, 傅雨田. 铝合金反射镜的发展与应用 [J]. *红外技术*, 2015, 37(10): 814-823.
- ZHANG D G, FU Y T. Development and application of aluminum mirrors in optical system [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(10): 814-823. (in Chinese)
- [15] 约德, 著, 周海宪, 程云芳, 译. 光机系统设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- Paul R Yoder Jr. *Optic-mechanical system design* [M]. ZHOU H X, CHENG Y F Transl.. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [16] 姜欣, 方立桥, 李明, 等. Isight 参数优化理论与实例详解 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 138-142.
- JIANG X, FANG L Q, LI M, et al.. *Detailed Explanation of Isight Parameter Optimization Theory and Examples* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2012: 138-142. (in Chinese)
- [17] WULICH D, KOPEIKA N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations [J]. *Optical Engineering*, 1987, 26(6): 529-533.
- [18] HADAR O, FISHER M, KOPEIKA N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part 2: Experiment [J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(5): 577-589.
- [19] HADAR O, FISHER M, KOPEIKA N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part III: numerical calculation of modulation transfer function [J]. *Optical Engineering*, 1993, 31(3): 581-589.
- [20] Z X T, J W CH, L ZH B, et al.. Study on computer-aided alignment method of a three-mirror off-axis aspherical optical system [C]. *Proc. of SPIE*. 2010, 7656: 6M-1.
- [21] GONG DUN W H, TIE-YIN T. Computer-aided Alignment of off-axis three-mirror imaging spectrometer system [C]. *SPIE*, 2013, 8910: 0Z-1.
- [22] HVISC A M, BURGE J H. Alignment analysis of four-mirror spherical aberration correctors [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 2008: 701819.
- [23] HARRINGTON D M, SUEOKA S R. Polarization modeling and predictions for Daniel K. Inouye Solar Telescope part 1: telescope and example instrument configurations [J]. *Astron. Telesc. Instrum. Syst.* 3 (1) (2017) 018002.
- [24] 祝耀昌, 石鹏颀, 程丛高, 等. 军用飞机机载设备振动试验要求和有关问题的讨论 (一) GJB 150. 16/16A 军用喷气式飞机和螺旋桨式飞机机载设备和外挂的振动试验要求及对比分析 [J]. *航天器环境工程*, 2016, 33(2): 127-135.
- ZHU Y CH, SHI P S, CHENG C G, et al.. The vibration testing requirements and related problems for military aircraft equipment (I): Vibration testing requirements and comparison of airborne equipment and external hanging of military jet and propeller aircraft in GJB 150. 16/16A [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2016, 33(2): 127-135. (in Chinese)
- [25] 刘杰坤, 马修水, 马摇颀. 激光多普勒测振仪研究综述 [J]. *激光杂志*, 2014, 35(12): 1-5.
- LIU J K, MA X SH, MA Y X. Review of laser doppler vibrometer [J]. *Laser Journal*, 2014, 35(12): 1-5. (in Chinese)
- [26] 杨正玺, 常洪振, 都佳逊. 基于激光多普勒原理的高温振动测量技术研究 [J]. *计测技术*, 2018, 38(6): 6-10.
- YANG ZH X, CHANG H ZH, DU J X, et al.. Research on high temperatruue vibration measurement technology based on laser doppler principle [J]. *Metrology & measurement technology*, 2018, 38(6): 6-10. (in Chinese)

作者简介:



李 颐(1992—), 男, 内蒙古锡林郭勒人, 博士研究生, 2014 年于浙江大学获得学士学位, 主要从事遥感仪器结构设计及优化等方面的研究。E-mail: liyi_zju@163.com

导师简介:



刘 伟(1967—), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 2005 年于长春光机所获博士学位, 主要从事空间遥感仪器结构设计、优化及测试等方面的研究。E-mail: liuwe@ciomp.ac.cn