

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.10.003

红外成像与激光发射系统 共口径结构轻量化设计*

衡楠^{1,2}, 郑锋华^{1,2,3}, 李金鹏^{1,2,3}

(1. 中国科学技术大学 南京天文仪器研制中心, 江苏 南京 210042; 2. 中国科学院南京天文仪器研制中心, 江苏 南京 210042; 3. 中国科学院南京天文仪器有限公司, 江苏 南京 210042)

摘要:针对某空间红外成像与激光发射共口径光学系统主支撑结构的轻量化设计问题,在低质量及高力学性能的基础上,对主支撑镜筒结构优化、仿真分析以及红外成像系统样机的性能检测等方面进行了研究。首先利用简化载荷的模型,根据变密度法,建立了以支撑镜筒柔度为目标函数,以质量保留比为约束的拓扑优化数学模型,实现了初步轻量化;然后基于响应面法,通过中心复合试验设计了多目标遗传算法,对初步轻量化模型进行了多目标优化,实现了最终轻量化;最后对红外成像系统实物样机的系统调制传递函数和焦距进行了检测。研究表明:经两次优化的模型轻量化率提高了 13%,1 阶固有频率提高了 24.7%,最大应力降低了 42.3%,最大变形减少了 20.7%;实际检测结果显示经优化设计的主支撑结构满足使用要求。

关键词:共口径;轻量化设计;拓扑优化;多目标优化

中图分类号:TH752.2;TH122

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)10-1020-07

Light-weight for the co-aperture structure of a infrared imaging and laser emission system

HENG Nan^{1,2}, ZHENG Feng-hua^{1,2,3}, LI Jin-peng^{1,2,3}

(1. Nanjing Astronomical Instruments Research Center, University of Science and Technology of China, Nanjing 210042, China; 2. Nanjing Astronomical Instruments Research Center, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China; 3. Nanjing Astronomical Instruments Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

Abstract: Aiming at the problem of light-weight design for a co-aperture structure of the infrared imaging and laser emission system, optimization and simulation of the main supporting tube and testing study on the infrared imaging prototype were finished based on low mass and high mechanical quality. Firstly, a model with simplified loads was used, the mathematical model and initial light-weight design structure were obtained based on variable density method which took flexibility as objective function, the mass retention ratio as constrain. Then the final light-weight design model was achieved by using central composite design and multiobjective genetic algorithm based on response surface method. Lastly, modulation transfer function and focal length of the infrared imaging prototype were tested. The simulation results indicate that light-weight rate of the final model is improved 13%, 1st natural frequency is increased 24.7%, the maximum equivalent stress is decreased 42.3% and the maximum deformation is decreased 20.7%, the experimental results show optimized tube can satisfy the operating requirements.

Key words: co-aperture; light-weight design; topology optimization; multiobjective optimization

收稿日期:2019-04-02

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20160154)

作者简介:衡楠(1993-),男,满族,河北承德人,主要从事光学精密仪器结构设计与分析方面的研究。E-mail:hengnan2016@126.com

通信联系人:郑锋华,男,研究员,硕士生导师。E-mail:13770646779@163.com

0 引言

随着空间观测技术的不断发展,各类空间探测器的技术要求也进一步提高,这将导致空间探测器的质量、尺寸随之增加,对光机结构的轻量化和精细化设计有了更加严格的要求^[1-2]。

离轴反射式光学系统有着无中心遮拦、能量损失小、无色差、可优化变量多,且可通过光路折返有效缩短结构尺寸等诸多优点,被广泛应用于卫星载荷、空间相机和望远镜等设计中。目前,离轴反射式光学系统的主支撑结构主要是筒壁式结构和桁架式结构,具体结构形式需要根据光学系统实际的质量分布和力学环境确定,但无论选用何种形式,支撑结构优化都是光学系统结构设计的重要内容。

魏磊^[3]针对某空间相机的主支撑结构作了不同方案的对比研究,重点对桁架式支撑结构进行了结构优化设计及动静态力学性能分析与实验,满足了设计要求;郭疆等^[4]对遥感相机的碳纤维筒壁式支撑结构进行了分析、优化与测试,保证了相机反射镜的位置精度和稳定性;席佳利等^[5]以一阶频率为优化目标,以质量为约束条件,对轻小型离轴三反空间相机主支撑结构进行了尺寸优化,使结构力学性能指标满足了设计要求;卢晓明等^[6]针对大口径空间望远镜主支撑镜筒刚度不足情况,采用无源结构拓扑优化与结构关键参数再设计的方法,使整体性能得到了提升。目前相关研究多是针对结构简单,功能单一的光机系统结构,对具有复杂载荷与功能的共口径机械结构轻量化设计还鲜有研究。

本文将对某空间红外探测与激光发射共口径光学系统主支撑结构进行轻量化设计,先采用拓扑优化方法确定共口径结构的轻量化形式和初步结构,再通过多目标优化方法对结构参数进行详细设计,得到最终优化设计方案,以保证其具有优良的综合力学性能。

1 系统组成与载荷简化

本文共口径光学系统主要用于空间红外目标探测以及多波段激光发射,系统总体结构组成如图 1 所示。

该系统主要由主、次镜组件,主支撑镜筒,激光合束发射组件,红外成像组件以及底座组成。其中,主支撑镜筒作为该光学系统的共口径结构,其主要功能是连接主、次镜组件以及为红外成像和激光发射系统提供安装平台,其刚度与强度的优劣将直接影响光学系统性能。

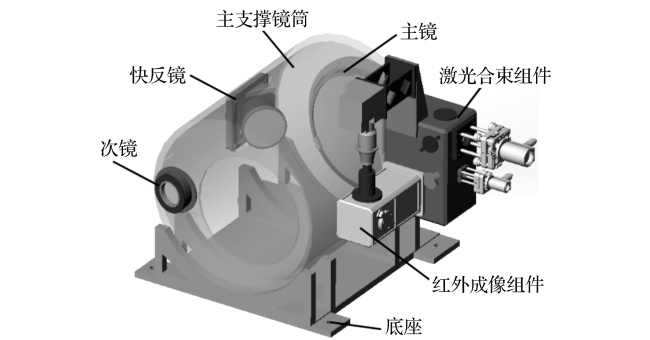


图 1 系统总体结构组成

为减小由热变形导致的光学系统偏差,主支撑镜筒材料选择低膨胀系数的殷钢(4J32),材料物理参数如表 1 所示。

表 1 殷钢材料物理参数

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/ GPa	强度极限/ MPa
4J32	8 100	0.25	138	470

依据材料的实际加工工艺,初步设计主支撑镜筒主体壁厚 10 mm,前安装板厚 6 mm,底安装板厚 10 mm,重量 31 kg。

初始模型及其载荷与约束如图 2 所示。

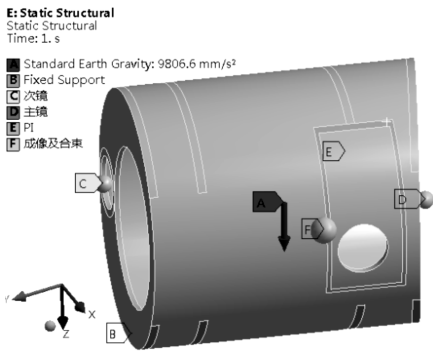


图 2 初始模型及其载荷与约束

镜筒的载荷主要来自镜筒自重及其支撑负载。优化时为减小计算量,将各负载用等质量点代替,并施加在各自质心位置上进行分析,约束底座圆弧安装面的 6 个自由度。

2 拓扑优化设计与分析

2.1 基于变密度法的数学模型

变密度法拓扑优化是引入一种密度可变的假想材料,其密度与材料的物理参数之间存在一种非线性关系。以材料密度作为设计变量,建立拓扑优化模型,将边界条件与载荷作为约束,并以结构最小应变能为目标,去除小于设定密度阈值的单元,从而实现结构的拓扑优化。

本文以工程分析中最常用的各向同性材料密度惩罚法(solid isotropic material with penalization, SIMP)构建拓扑模型^[7],材料属性与单元相对密度的函数关系为:

$$\begin{cases} E(x) = x^p E_0 \\ K(x) = x^p K_0 \\ \mu(x) = \mu_0 \\ M(x) = x^p M_0 \\ 0 < x_{\min} \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x —材料密度; p —惩罚因数, $p > 1$; $E_0, E(x)$ —优化前、后的弹性模量; $K_0, K(x)$ —优化前、后的刚度矩阵; μ_0 —材料的泊松比; $M_0, M(x)$ —优化前、后的质量; $x_{\min}$ —材料相对密度的下限。

以支撑镜筒的结构总体柔度最小化为目的,以质量保留比例为约束条件,对离散后的有限元模型进行拓扑优化,即:

$$\begin{cases} \text{Find: } X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \\ \min: C(x) = U^T K U = \sum_{i=1}^n (x_i)^p u_i^T k_0 u_i \\ \text{Subject-to: } \begin{cases} K U = F \\ \alpha \leq \frac{M(x)}{M_0} \leq \beta \\ 0 < x_{\min} \leq x \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_i —单元材料相对密度; U —位移矩阵; K —结构总刚度矩阵; F —载荷向量; α, β —质量约束比例的上、下限; u_i —离散单元的位移列向量; k_0 —离散单元的初始刚度矩阵。

以上模型旨在规定支撑镜筒结构减重比例条件下,使得结构总体刚度最优。

2.2 拓扑优化设计

基于有限元分析软件平台的拓扑优化流程主要分为4步^[8]:

- (1) 提供初始分析模型;
- (2) 确定模型边界条件与载荷;
- (3) 自定义设计与保留区域以及目标函数和约束;
- (4) 循环更新设计变量,满足收敛容差直至收敛。

本研究借助于 Workbench 中的 Topology Optimization 模块,对主支撑镜筒模型进行优化。变密度下限 0.001,收敛容差精度 0.1%,刚度矩阵的惩罚因数取 3,优化部分质量保留比例范围设为 20% ~ 30%,既保证轻量化效果,又有较好的收敛性。

优化过程中,质量保留比迭代曲线如图 3 所示。

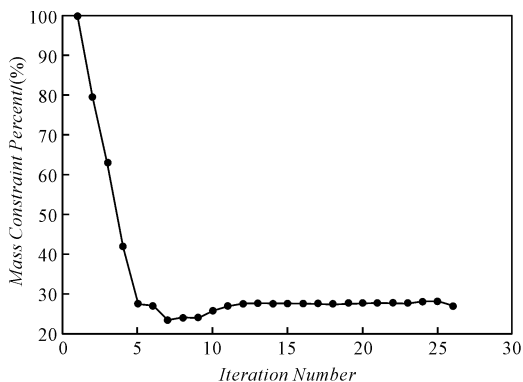


图3 质量保留比迭代曲线

横坐标—计算时的迭代步数;纵坐标—拓扑优化后的结构质量保留百分比

从图3可以看出:在经过26次计算后,结构的拓扑优化结果既能满足约束条件,又可达到收敛精度要求,最终保留质量为初始质量的27.703%。

根据计算结果,拓扑优化后结构模型的约束和载荷承载部位基本得到保留,而中间过渡连接区域去除较多,前后安装板有部分去除。拓扑密度计算结果提供了一种主镜筒设置环形筋,并对前、后安装板做减重孔的思路。

根据自身的载荷分布要求,本研究对支撑镜筒进行初步的轻量化设计,轻量化后质量为18.68 kg。

初步轻量化设计模型如图4所示。

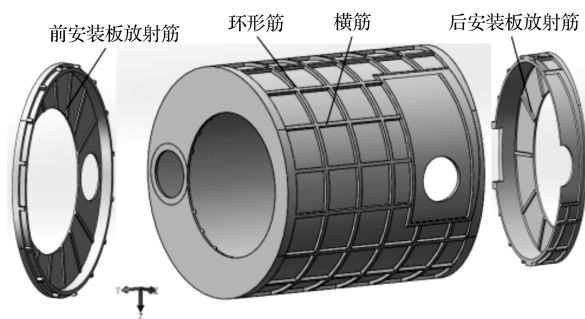


图4 初步轻量化设计模型

首先,镜筒部分采用多层环筋与横筋相结合的方式,对安装位置进行相应的简化,忽略倒角、圆角和螺纹孔等,对前、后安装板的减重部分设置放射筋。此外,考虑到外界杂散光对系统成像的影响,整个结构保持相对封闭状态。

2.3 拓扑优化模型分析

根据光学系统公差分析以及结构设计指标,优化后的最终模型需满足一定的刚、强度要求。

具体结构刚、强度所允许偏差要求如表2所示。

表 2 结构刚、强度允许的偏差要求

类别	技术要求
镜间距	$\pm 0.02\text{ mm}$
镜片倾斜	$\pm 18''$
基频范围	整机 $\geq 100\text{ Hz}$
	主支撑镜筒 $\geq 400\text{ Hz}$
应力变化	最大应力 $\sigma_{\max}$ < 强度极限 σ_b 或屈服极限 σ_s

初次轻量化的模型的各处加强筋厚度和宽度按照经验设置,导入有限元软件对其模态、最大变形以及最大等效应力进行分析。

初次轻量化模型有限元分析结果如表 3 所示。

表 3 初次轻量化模型有限元分析结果

分析项	分析结果		
模态/Hz	1 阶	2 阶	3 阶
	411	736	832
最大变形/mm	0.001 464		
最大应力/MPa	1.544		

由表 3 可知:根据经验设计的初始轻量化模型,在载荷作用下的最大变形为 0.001 464 mm,最大等效应力值为 1.544 MPa,结构的起振频率为 411 Hz。上述分析结果均能满足表 2 所示的设计要求,说明初步轻量化设计结构的强度和刚度均足够。但是以上设计采用的尺寸均是估计和经验数据,并非最优尺寸,所以还需对初始轻量化模型进一步作参数优化,使结构在刚度好、强度高的目标基础上,实现更高轻量化率。

3 基于响应面法的多目标优化设计

3.1 响应面法

响应面法(response surface method, RSM)可以采用多种不同试验设计理论对生成的设计点集合进行试验,得到相应的数据空间,然后利用多元高次方程拟合目标函数与约束函数的关系,并由此预测非设计点的响应的方法。该方法包含试验设计、数学建模、模型检验以及搜索最佳符合性目标等内容。

n 个变量下的二阶标准响应面方程为:

$$y(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{j-1} a_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

(3)

式中: $x = (x_1, x_2 \cdots x_n)$; $x_i (i = 1, 2 \cdots n)$ —设计参数变量; a_0, a_i, a_{ii}, a_{ij} —方程待定系数; ε —响应噪声或误差(总个数为 $(n + 1)(n + 2)/2$ 个,通过最小二乘法求解待定系数^[9])。

3.2 试验设计

3.2.1 模型变量参数设置

支撑镜筒外形尺寸已经确定,只对可做轻量化部分的加强筋、放射筋结构设置可变参数,选取对结构整体性能影响较大的 8 个参数作为设计变量,包括:主镜筒壁厚 P_1 、横筋宽度 P_2 、前安装板放射筋宽度 P_3 、后安装板放射筋宽度 P_4 、环形筋宽度 P_5 、环形筋间距 P_6 、前安装板放射筋厚度 P_7 、后安装板放射筋厚度 P_8 。

选定的设计参数初值及其优化区间如表 4 所示。

表 4 设计参数初值及优化区间

参数	初始值/mm	上限/mm	下限/mm
P_1	304	308	298
P_2	8	12	4
P_3	5	7	3
P_4	4	6	3
P_5	8	15	4
P_6	55	49	60
P_7	3	4.5	2
P_8	4	7	3

3.2.2 中心组合试验设计

试验设计以概率论与数理统计为基础,确定以少量输入信息获得更多输出响应的设计变量的方法。中心组合设计(central composite design, CCD) 又称二次回归旋转设计,由全因子设计、轴点设计或星点设计与零水平的中心点重复试验 3 部分构成,应用各影响因子的二次多项式,来预测其对评价指标的作用。该方法拓展了设计空间,并得到高阶信息,能够给响应表面近似模型提供样本数据,具有设计简单、试验次数少、预测性好等优点^[10-11]。

全因子设计也称析因设计,该部分试验点数为:

$$u = 2^{n-\lambda}$$

(4)

式中: n —设计变量,本文取 $n = 8$; λ —析因系数, $\lambda = 2 (n = 8 \text{ 时})$ 。

轴点设计或星点设计部分试验点数为:

$$v = 2n$$

(5)

轴点或星点拓展了设计区域,提供了对二阶响应面模型中纯平方项 a_{ii} 的估计。中心点也称设计中心,位于图形的中心。所以优化设计的总试验点数为:

$$z = 2^{n-\lambda} + 2n + 1 = 2^{8-2} + 2 \times 8 + 1 = 81$$

(6)

3.3 基于遗传算法的多目标优化

多目标遗传算法(multiobjective genetic algorithm, MOGA) 支持多目标、多约束,迭代分析时能够提供更精确的求解结果,适用于计算全局的最优解集,并可避免局部最优的缺陷,通用性和鲁棒性好。根据上述初步轻

量化后的支撑镜筒性能分析结果,在保留一定目标余量的前提下,确定优化设计的目标函数与约束条件。以总体质量最小、结构 1 阶固有频率最高、总体最大变形最小及最大等效应力最小为优化目标,同时以质量不大于 18 kg、1 阶固有频率不小于 450 Hz 为约束条件。其数学模型为:

$$\begin{cases} X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8] \\ \{x_l\} \leq \{x\} \leq \{x_u\} \\ \min: \begin{cases} Mass(x) \\ \frac{1}{f_1(x)} \\ Def(x) \\ Stress(x) \end{cases} \\ \text{Subject - to: } \begin{cases} Mass(x) \leq 18 \text{ kg} \\ f_1(x) > 450 \text{ Hz} \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中: X —输入变量向量; $\{x_l\}$ —输入变量下限向量; $\{x_u\}$ —输入变量上限向量; $Mass(x)$ —质量; $f_1(x)$ —1 阶固有频率; $Def(x)$ —总体变形; $Stress(x)$ —等效应力。

依据试验设计点确定样本空间范围,经响应面方程拟合计算后,得到大量样本数据,由统计分析可以获得支撑结构各设计参数对各优化目标的灵敏度,如图 5 所示。

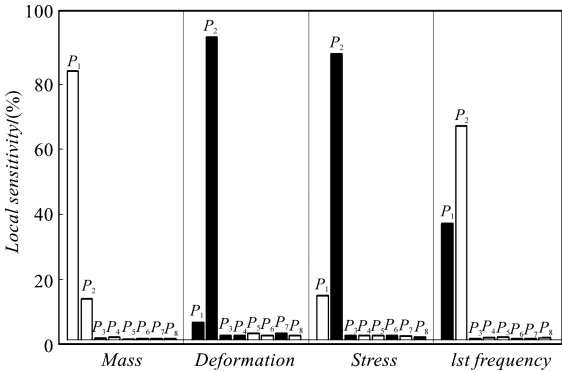


图 5 支撑结构设计参数灵敏度

横坐标—4 项优化目标;纵坐标—参数 $P_1 \sim P_8$ 对不同优化目标的灵敏度;白色—正效应;黑色—反效应

从图 5 中可以看出:主镜筒壁厚 P_1 和横筋宽度 P_2 对目标函数的灵敏度较高,而其余参数的灵敏度相对较低,说明参数 P_1 、 P_2 对输出影响最大,参数 $P_3 \sim P_8$ 的影响较小或可忽略;对结构质量来说,减小 P_1 、 P_2 更利于轻量化;对结构刚度来说,减小 P_1 、增大 P_2 有利于 1 阶固有频率的提高;对结构强度来说,增大 P_2 对减小结构应力与变形效果明显。

多目标遗传算法经过 38 400 次迭代进化后,得到了大量的样本数据,这些样本数据构成了针对本文优

化计算模型的样本空间。在样本空间中选取 3 组最符合设计目标的参数集合,作为优化目标函数的最优设计候选点。

相应的具体参数如表 5 所示。

表 5 最优解候选点

参数		第 1 组	第 2 组	第 3 组
设计变量	P_1	298.03	298.05	298.09
	P_2	7.21	7.01	7.19
	P_3	3.19	3.02	4.03
	P_4	3.47	3.01	3.78
	/mm P_5	8.92	7.01	7.28
	P_6	53.06	50.05	51.1
	P_7	3.87	2.51	3.64
	P_8	3.07	3.015	4.16
优化目标	质量/kg	12.883	12.834	12.958
	最大变形/mm	0.001 34	0.001 33	0.001 35
	等效应力/MPa	1.048	1.050	1.043
	1 阶频率/Hz	482.5	483	481.7

在结构的强度相似的情况下,综合考虑轻量化效果与力学特性,选取第 2 组参数作为设计依据。

考虑实际加工的时间和成本,对优化后参数进行修正,修正结果如表 6 所示。

表 6 参数修正结果

参数	初始值/mm	优化值/mm	修正值/mm
P_1	304	298.05	298
P_2	8	7.01	7
P_3	5	3.02	3
P_4	4	3.01	3
P_5	8	7.01	7
P_6	55	50.05	50
P_7	3	2.51	2.5
P_8	4	3.015	3

3.4 多目标优化模型分析

根据表 6 中的修正值,对初始轻量化模型进行重建,得到最终模型的质量约为 12.932 kg。

对其模态、最大变形及最大等效应力进行分析,最终轻量化模型有限元分析结果如表 7 所示。

表 7 最终轻量化模型有限元分析结果

分析项	分析结果		
模态/Hz	1 阶	2 阶	3 阶
	512.5	784.7	877.7
最大变形/mm	0.001 16		
最大应力/MPa	0.89		

从表 7 可以看出:结构承载情况下最大变形量减小为 0.001 16 mm,在光学系统调节量的可接受范围内;最大等效应力为 0.89 MPa,远小于材料的许用应力,有足够的安全裕度。

两次优化的分析结果对比如表 8 所示。

表 8 初次和最终轻量化模型分析结果对比

类别	初步模型	最终模型	变化量
质量/kg	18.68	12.932	降低 13%
1 阶固有频率/Hz	411	512.5	提高 24.7%
等效应力/MPa	1.544	0.89	降低 42.3%
最大变形/mm	0.001 464	0.001 16	减少 20.7%

拓扑优化后的初步轻量化模型,在采用基于响应面法的多目标优化方法进行优化后,支撑镜筒质量降低了 13%,即轻量化率提高了 13%;1 阶固有频率达到 512.5 Hz 以上,提高了 24.7%;最大等效应力降低 42.3%,最大变形量减少了 20.7%。

以上分析结果表明:相比于经验设计的初步轻量化支撑结构,参数优化后的最终轻量化模型使得在约束条件下强度冗余得到了进一步释放,体现了将两种优化方法结合的优越性。

3.5 实验及结果分析

为进一步验证优化后主支撑镜筒结构的实际使用效果,本研究在零部件加工完成后按照设计方案进行了整机装调,并对红外成像系统的调制传递函数(modulation transfer function, MTF)与实际焦距进行了检测。

不同视场角下,红外成像探测系统在弧矢面与子午面的 MTF 测试值如表 9 所示。

表 9 不同视场角下系统 MTF 测试结果 (17 lp/mm)

视场角/(°)	实测 MTF		理论 MTF	
	Tan	Sag	Tan	Sag
-0.8	0.418	0.451	0.444 8	0.449 9
-0.6	0.423	0.429	0.445 3	0.448 2
-0.4	0.441	0.417	0.444 8	0.446 0
-0.2	0.418	0.428	0.443 9	0.444 2
0.0	0.429	0.421	0.443 5	0.443 5
0.2	0.416	0.403	0.443 9	0.444 2
0.4	0.412	0.431	0.444 8	0.446 0
0.6	0.443	0.440	0.445 7	0.448 2
0.8	0.425	0.458	0.444 8	0.449 9

从表 9 结果可以看出:在指标要求的 ±0.2° 视场内,光机系统的实测传递函数与理论设计结果最大偏差约为 9%,满足要求。

笔者利用平行光管(焦距 10 m)和红外成像系统的焦距、像斑比例关系,对成像系统实际焦距进行检测。

焦距检测原理如图 6 所示。

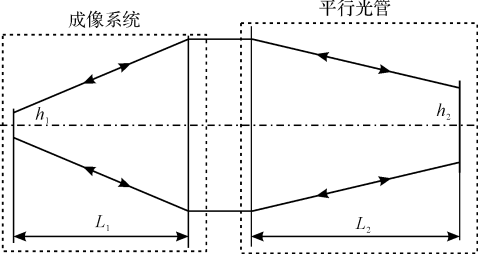


图 6 焦距检测原理

平行光管焦面处黑体光源发出的光,经过星点靶标和成像系统后到达红外探测器焦面。测量聚焦光斑大小,根据比例公式,即:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{L_1}{L_2} \tag{8}$$

式中: h_1 —成像系统实测像斑大小, $h_1 = 272 \mu\text{m}$; h_2 —星点靶标孔径, $h_2 = 4.8 \text{ mm}$; L_1 —成像系统待测焦距; L_2 —平行光管焦距, $L_2 = 10\,000 \text{ mm}$ 。

经计算,得到成像系统实测焦距约为 $L_1 = 566.7 \text{ mm}$,与理论设计值 564 mm 偏差约为 0.47%,满足要求。

通过以上对成像光学系统相关指标的实测表明:该光机结构能够满足相关技术要求,进一步证明了经过优化的主支撑镜筒实际使用效果良好,轻量化设计较为合理。

4 结束语

针对某红外成像与激光发射共口径光学系统主支撑镜筒的轻量化问题,本文采取拓扑优化与多目标优化相结合的方法,对初步设计模型进行了轻量化设计与仿真分析,并对红外成像系统样机进行了测试,分析如下:

(1) 基于变密度法的拓扑优化法提供了一种负载条件下镜筒结构的最佳“去材”思路,为进一步实现精细轻量化设计提供了方向;

(2) 采用基于响应面法的多目标优化设计方法,对拓扑优化后的初步轻量化模型进行了多参数分析,得到了各输入变量对结构目标函数的影响程度,确定了各设计变量的修改方向,据此完成了最终的轻量化设计;

(3) 多目标参数优化设计能够很好地对经验设计模型进行修正与改善,从而得到了最优的材料分布形态,使结构的减重效果与性能指标相互平衡,进而达到了最佳优化效果,为带有复杂载荷的筒壁式共口径光学系统机械结构轻量化设计提供了参考。

参考文献 (References):

[1] 王小勇. 空间光学技术发展展望[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(4): 79-82.

[2] 张东阁. 大视场高分辨率空间红外光学系统关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学上海技术物理研究所, 2014.

[3] 魏 磊. 长焦距宽视场空间相机主支撑结构优化设计[D]. 长春: 中国科学院大学长春光学精密机械与物理研

- 究所,2017.
- [4] 郭 疆,邵明东,王国良,等. 空间遥感相机碳纤维机身结构设计[J]. 光学精密工程,2012,20(3):571-576.
- [5] 席佳利,张 雷,杨 林,等. 空间轻小型离轴三反相机桁架主支撑结构设计[J]. 机械强度,2017,39(2):441-445.
- [6] 卢晓明,贾建军,周成林,等. 空间望远镜主支撑镜筒结构优化设计[J]. 天津工业大学学报,2018,37(4):84-87.
- [7] 许华旸,关立文,王立平,等. 惯性载荷下飞行模拟器大臂结构的拓扑优化[J]. 机械工程学报,2014,50(9):14-17.
- [8] 刘仲宇,张 涛,王 平,等. 红外引导头稳定平台主框架拓扑优化设计[J]. 红外与激光工程,2016,45(2):1-5.
- [9] 喻高远,肖文生,孙 瑞,等. 基于响应面法的盘鼓式制动器优化设计[J]. 机械设计,2017,34(1):42-45.
- [10] 张志红,何 桢,郭 伟. 在响应曲面方法中三类中心复合设计的比较研究[J]. 沈阳航空工业学院学报,2007,24(1):87-89.
- [11] POLES S, FU Y, RIGONI E. The effect of initial population sampling on the convergence of multi-objective genetic algorithms[J]. **Multi-objective Programming and Goal Programming, Theoretical Results and Practical Applications**, 2009,61(8):123-133.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

衡 楠,郑锋华,李金鹏. 红外成像与激光发射系统共口径结构轻量化设计[J]. 机电工程,2019,36(10):1020-1026.

HENG Nan, ZHENG Feng-hua, LI Jin-peng. Light-weight for the co-aperture structure of a infrared imaging and laser emission system[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(10):1020-1026.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1012 页)

- [11] LEE H J, LEE S, CHANG W H, et al. A wearable hip assist robot can improve gait function and cardiopulmonary metabolic efficiency in elderly adults [J]. **IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering**, 2017,25(9):1549-1557.
- [12] SEO K, LEE J, LEE Y, et al. Fully autonomous hip exoskeleton saves metabolic cost of walking[C]. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Stockholm:IEEE,2016.
- [13] YASUHARA K, MIYAKE Y. Control system for walking assist device [P]. Europe:EP20030792649, 2005-06-29.
- [14] SUGAR T G, BATES A, HOLGATE M, et al. Limit cycles to enhance human performance based on phase oscillators [J]. **Journal of Mechanisms and Robotics**, 2015,7(1):011001.
- [15] DE F J, SUGAR T G, REDKAR S. Nonlinear phase-based oscillator to generate and assist periodic motions [J]. **Journal of Mechanisms and Robotics**, 2017,9(2):024502.
- [16] COLLONS S H, WIGGIN M B, SAWICKI G S. Reducing the energy cost of human walking using an unpowered exoskeleton [J]. **Nature**, 2015,522(7555):212-215.
- [17] ZHANG J, FIERIS P, WITTE K A, et al. Human-in-the-loop optimization of exoskeleton assistance during walking [J]. **Science**, 2017,356(6344):1280-1284.
- [18] KIRTLEY C. Clinical gait analysis [J]. **IEEE Engineering in Medicine & Biology Magazine**, 2013,7(3):35-40.
- [19] COLOMBO G, JOERG M, SCHREIER R, et al. Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis [J]. **Journal of Rehabilitation Research & Development**, 2000,37(6):693-700.

[编辑:周昱晨]