

小型高分辨率空间相机光学系统低误差敏感度设计

秦子长^{1,2}, 任成明^{1,2}, 戚允升^{1,2}, 王泽斌^{3,4}, 王 琪⁵, 孟庆宇^{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;
3. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109;
4. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;
5. 航天系统部装备部军事代表局驻长春地区军事代表室, 吉林 长春 130033)

摘 要: 系统性地采取严格控制光学元件加工装配精度、采用大质量高稳定性光机结构、运用精密热控等方法, 是以往保证空间相机光学系统高性能成像质量的常规方法, 但同时该策略的实施也给相机研制带来了较高的经济与资源代价。面对高性能空间相机低成本化的发展趋势, 降低光学系统误差敏感度, 在保证成像性能的同时降低实现成本, 是需要面对与解决的课题。以某小型空间相机研制为背景, 应用光学系统低误差敏感度设计方法(降敏设计方法), 对相机焦距 500 mm、相对孔径 1:5、视场角 $2\omega=4^\circ$ 的同轴两镜折反射式光学系统进行了降敏设计。结果表明, 基于降敏设计方法获得的光学系统不仅像差校正理论结果表现优异, 调制传递函数接近衍射极限, 同时, 仿真显示其在误差干扰下光学系统鲁棒性好, 为相机的快速低成本制造提供了保证。光学系统降敏设计方法对高性能小型空间载荷的设计与低成本快速研制具有重要的应用价值。

关键词: 空间相机; 光学系统设计; 误差敏感度; 降敏设计方法; 折反射式光学系统

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220365

Low error-sensitive design of small-sized high-resolution space camera optical system

Qin Zichang^{1,2}, Ren Chengming^{1,2}, Qi Yunsheng^{1,2}, Wang Zebin^{3,4}, Wang Qi⁵, Meng Qingyu^{1*}

- (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;
3. Shanghai Institute of Aerospace Systems Engineering, Shanghai 201109, China;
4. Optical Engineering Research Centre for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
5. The Military Representative Office in Changchun of Military Representative Bureau of Space System Equipment Department, Changchun 130033, China)

Abstract: Systematically adopting strict control over the processing and assembly accuracy of optical elements, adopting high-quality and stable opto mechanical structure, and using precision thermal control are the conventional methods to ensure the high performance imaging quality of the optical system of space cameras in

收稿日期: 2022-05-30; 修订日期: 2022-07-06

基金项目: 中国科学院青年创新促进会 (2019219); 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划 (YSBR-066);

国家自然科学基金 (61705220)

作者简介: 秦子长, 男, 博士生, 主要从事光学系统设计方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 孟庆宇, 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学系统设计理论与设计方法、空间光学传感器方面的研究。

the past, but at the same time, the implementation of this strategy also brings high economic and resource costs to camera development. In the face of the development trend of low-cost high-performance space optical cameras, reducing the error sensitivity of the optical system and lowering the implementation cost while ensuring the imaging performance are the issues that need to be faced and solved. In this paper, a compact space camera as a background, and the low error-sensitivity design method (desensitization design method) is applied to a coaxial two-mirror catadioptric optical system with a focal length of 500 mm, a relative aperture of 1 : 5, and a field of view of $2.75^{\circ} \times 2.75^{\circ}$. The results show that the optical system, based on the desensitized design method, not only gets excellent aberration correction theoretical results and modulation transfer function which is close to the diffraction limit, but also shows that the optical system is robust under the error interference in the simulation, which provides a guarantee for the rapid and low-cost manufacturing of the camera. The optical system desensitization design method has an important application value for the design and rapid development of high-performance small space loads at low cost.

Key words: space camera; optical system design; error sensitivity; desensitization design method; catadioptric optical system

0 引言

高性能小型空间光学相机应用需求广泛,面对高质量成像要求,在光学系统制造过程中需要对光学元件加工误差和装配误差进行严格的控制,光机结构与热控系统也需要面向光学元件稳定性进行强化设计,以尽可能地减小工作环境对空间相机光学系统造成的误差干扰。一系列策略的实施过程给相机研制带来了较大的投入和消耗,这与高性能小型空间光学相机研制快速化、低成本化的发展趋势已不适应。具备低误差敏感度特征的光学系统可以更好地抵抗由光学元件直接误差或间接误差引起的像质退化,降低实现难度,有效节约成本。因此,开展光学系统低误差敏感度设计(降敏设计),在保证光学系统成像质量的前提下,提升光学系统抵抗误差干扰的能力,使系统鲁棒性增强,具有重要的现实意义。

目前,典型的光学系统误差敏感度优化方法有全局优化法^[1-7]、多重结构优化法^[8-11]、参数控制法^[12-16]以及自由曲面面型优化法等^[17-20]。全局优化法是在设计过程中先对光学系统进行像差校正,对完成像质优化的光学系统进行大样本优化和迭代,从大量的设计样本中选取公差鲁棒性较好的系统,进而直接获得低误差敏感度光学系统的方法。全局优化算法可以在一定范围内搜索符合条件的光学系统的最优解,但是需要依靠计算机强大的计算能力,并且需要较长的计算时间。多重结构优化法是在原始光学系统结构的基础上,建立具有包含不同误差类型的多重结构,

模拟生产加工和实际应用过程中光学系统可能产生的误差类型与误差量级,对原始光学系统结构与具有误差扰动的多重结构进行同步优化,使所有结构的成像质量仍然在可接受的范围之内,即可说明原始光学系统具备较好抵抗误差干扰的能力。研究人员发现光学系统的一些参数与误差敏感度高度相关,且可以通过数学推导获得这些参数与误差敏感度的规律或明确关系,并据此开展了大量研究,建立了以参数控制为核心的低误差敏感度设计方法。

文中根据低倾斜误差敏感度评价函数^[21],提出了一种折反射式光学系统降敏设计方法,对高分辨率小型空间相机光学系统进行了降敏优化设计,所得光学系统成像质量良好,调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)接近衍射极限。通过对降敏设计后的光学系统施加光学元件位置误差扰动,分析结果显示,对比未采用降敏设计方法获得的光学系统,降敏设计所获得的光学系统其误差敏感度得到了有效降低。

1 光学系统降敏设计方法

1.1 误差敏感度评价函数

倾斜是光学元件位置误差的重要表现形式^[22],倾斜误差主要会引起像散等非对称像差,难以通过离焦的方式对像质进行补偿。因此,在光学系统误差敏感度理论研究中,倾斜误差一直被作为重要的研究对象。

误差敏感度评价函数是光学系统降敏设计的核心,为了建立有效的评价函数,首要是探究光学系统

在受到倾斜误差扰动的条件下,其内部参数与误差敏感度的明确数学关系,进而在后续降敏设计中对这些参数进行控制,达到降敏的目的。项目组基于几何光线追迹的方法建立了单镜、两镜反射式光学系统模型,以误差所致光程差变化量来表征光学系统对误差的敏感程度,通过推导受到倾斜误差干扰前后光学系统任意一根光线光程差的变化情况得出,光线与镜面交点处切线斜率越大,误差所致光程差变化量越小,意味着误差敏感度更低。

因此,确定了光线与镜面交点处的切线斜率是表征光学系统误差敏感度的关键因素,据此提出了一个以切线斜率为核心的倾斜误差敏感度评价函数。该方法不仅适用于反射式光学系统,同样适用于折射式光学系统。

光线在光学元件交点处传播的示意图如图 1 所示。入射光线经过光学元件时,与光学元件交点为 N (或 M),在 N 点(或 M 点)做光学元件的切线,切线斜率定义为 E_T 。

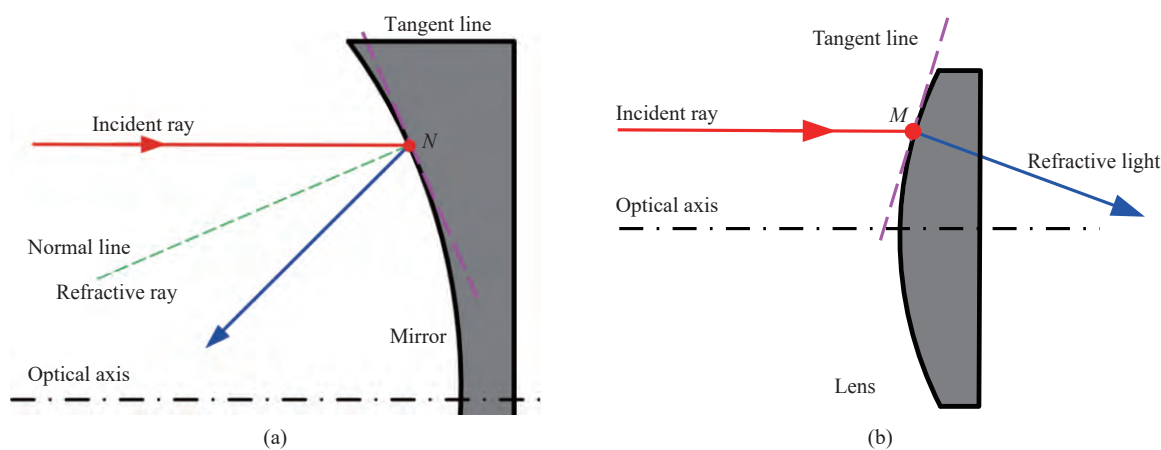


图 1 光线与光学元件交点处光线传播示意图。(a) 反射镜; (b) 透镜

Fig.1 Schematic diagram of light propagation at the intersection of light and optical elements. (a) Mirror; (b) Lens

由前文分析可知,光线与镜面交点处切线斜率 E_T 与光学系统倾斜误差敏感度成反比,因此在降敏设计中 E_T 数值越大越好,但 E_T 作为正切函数不能获得最大值,导致无法设定一个合适的阈值,且从优化函数角度分析,优化过程通常是获得优化函数的最小值。为了便于设置误差敏感度阈值,定义 E_T 倒数的绝对值 $E=|1/E_T|$,构建误差敏感度评价函数。

针对单一视场,定义光学系统的所有光学表面误差敏感度评价函数为 E_S :

$$E_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n E_i^2}{n}} \quad (1)$$

光学系统中全部视场的综合误差敏感度 $E_{S,F}$:

$$E_{S,F} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m E_{S,k}^2}{m}} \quad (2)$$

式中: i 为光学系统的每个光学表面编号,共 n 个面;

k 为光学系统的视场编号,共 m 个视场。

1.2 光学系统降敏设计方法

根据前文分析,针对折反射式光学系统建立以倾斜敏感度评价函数 $E_{S,F}$ 为核心的光学系统降敏设计方法,其主要思想是通过优化设计,使光学系统 $E_{S,F}$ 数值达到目标阈值,获得误差敏感度低的光学系统。设计方法主要分为以下三个步骤:

(1) 根据设计指标计算初始光学系统初始结构。

(2) 视场拓展与像质优化。若满足像质要求,则继续步骤(3)进行降敏优化设计,若不满足像质要求,则根据需求通过增加光学元件数量、光学元件非球面化等方式继续进行像质优化。

(3) 误差敏感度优化,若满足误差敏感度要求则输出设计结果,若不满足要求则对光学系统进行误差敏感度优化。

输出同时满足像质要求和误差敏感度要求的设计结果。

光学系统误差敏感度优化方法流程如图 2 所示。其中,步骤(3)为光学系统误差敏感度的评价和优化部分,是针对完成像质优化的系统设计的,共分为五个子步骤:

1) 误差敏感度判断阈值 E_V 赋值。对于首次设计

的光学系统,可以通过误差敏感度函数应用积累给定判断阈值 E_V ,也可以通过批量生成该指标下的光学系统,统计应用一般光学设计软件优化设计方法得到的误差敏感度范围,进而给出判断阈值 E_V 。

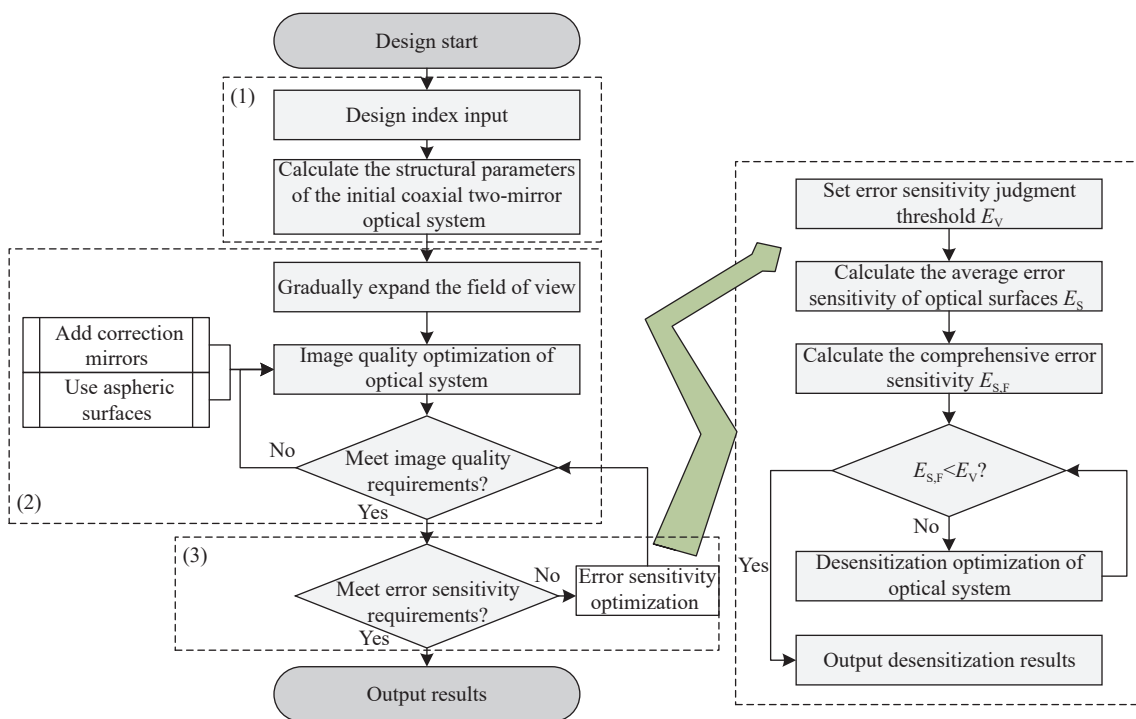


图 2 光学系统误差敏感度优化方法流程图

Fig.2 Flow chart of the optimization method for error sensitivity of the optical system

2) 根据光学系统参数,计算光学系统中单一视场的面平均误差敏感度 E_s ,根据需要设定视场数量,并计算面和视场的综合误差敏感度 $E_{s,F}$ 。

3) 对光学系统进行误差敏感度评价,若满足误差敏感度要求,则跳过误差敏感度优化子步骤 4),若不满足则继续子步骤 4)。

4) 对系统进行误差敏感度优化,误差敏感度优化过程以 $E_{s,F}$ 为评价函数,不断降低系统的误差敏感度直至满足要求。误差敏感度优化完成的系统返回子步骤 3)。

5) 输出结果。子步骤流程图如图 2 右侧虚线框所示。

2 小型空间相机光学系统降敏设计

2.1 指标输入

基于所提出的低误差敏感度设计方法,对一台小

型高分辨率空间相机的光学系统进行设计。相机具有质量轻、体积小、经济性强的条件约束,因此在相机研制中,希望在保证高分辨率成像性能的前提下,尽可能地采用简单的光机结构配合一般精度的集成装调工艺进行产品的快速生产。相机光学系统指标如表 1 所示。

表 1 光学系统指标要求

Tab.1 Optical system index requirements

Optical system index	Requirement
Focal length/mm	500
F number	5
Wavelength/nm	450-750
Field of view/(°)	$2\omega=4$
Total length/mm	<180
Back working distance/mm	>15

2.2 设计过程

根据光学系统指标要求,选择同轴两镜折反射式光学系统,按照 1.2 节提出的低误差敏感度光学系统设计方法进行设计。

2.2.1 构建初始系统

根据初级像差理论求解同轴两反射镜光学系统参数^[23],同轴两反射镜光学系统如图 3 所示。

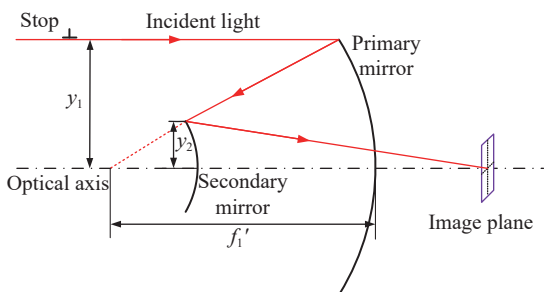


图 3 同轴两反射镜光学系统

Fig.3 Coaxial two-mirror optical system

轴向遮拦比 α 、次镜放大率 β 与光学系统几何参数具有如下数学关系:

$$\alpha = \frac{y_2}{y_1} \quad (3)$$

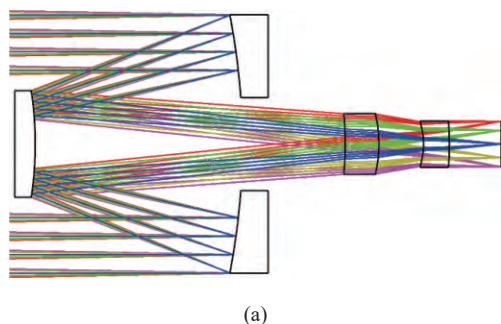
$$\beta = \frac{f'}{f_1'} \quad (4)$$

式中: y_1 为主镜半口径大小; y_2 为次镜半口径大小; f' 为系统焦距, f_1' 为主镜焦距。

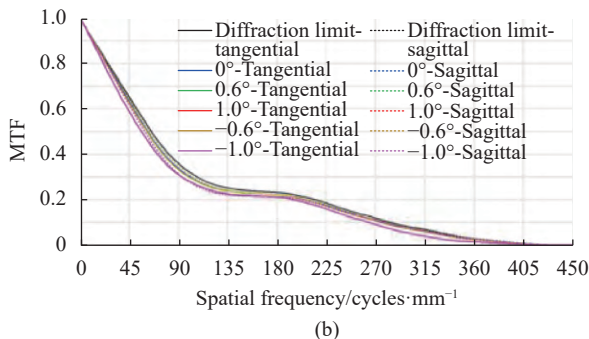
当球差和彗差为零时,即可求得 k_1 、 k_2 分别为:

$$k_1 = -\left(1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^2}\right) \quad (5)$$

$$k_2 = -\frac{\frac{2\beta}{1-\alpha} + (1+\beta)(1-\beta^2)}{(1+\beta)^3} \quad (6)$$



(a)



(b)

图 5 2° 视场包含两片校正镜的折反射光学系统。(a) 布局图; (b) MTF 图

Fig.5 Catadioptric optical system with two correcting mirrors in a 2° field of view. (a) Layout diagram; (b) MTF diagram

通过对光学系统要求的分析,设定次镜对主镜的遮拦比 $\alpha=0.35$,次镜放大率 $\beta=-5$,考虑最终设计需要在两反光学系统后工作距中加入校正镜实现像差校正,故要求初始结构的后工作距大于 80 mm,通过计算即可获得同轴两反射镜光学系统的初始系统,系统的布局图如图 4 所示。

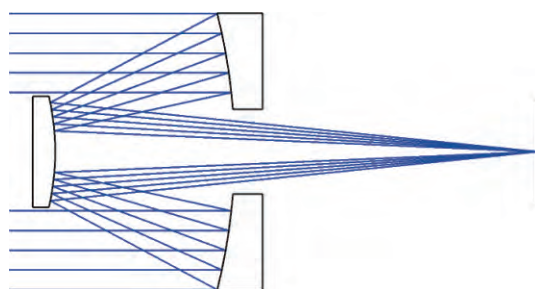


图 4 同轴两反光学系统初始系统布局图

Fig.4 Initial system layout of the coaxial two-mirror optical system

2.2.2 视场拓展与像质优化

设计采用逐步增大视场的方法^[24],首先将视场扩大为 $2\omega=2^\circ$,增加由两片透镜构成的校正镜组,将光学镜面的曲率半径和间隔设置为优化变量,初步优化设计结果显示,在 2° 视场范围内,光学系统成像质量好,实现近衍射限成像,布局图和 MTF 图如图 5 所示。

在视场 $2\omega=2^\circ$ 设计结果的基础上,将光学系统视场扩大至 $2\omega=4^\circ$,此时两片校正镜构成的校正镜组校正能力不足,球差和畸变较为严重,为了校正像差,将校正镜组增加至四片透镜,随后对校正镜组中所有透镜表面的曲率半径和厚度进行优化,优化过程要保证透镜的可加工性,且总长不能大于 180 mm,优化之后的光学系统布局图和 MTF 图如图 6 所示。

此时的光学系统成像质量稍差,未能实现近衍射

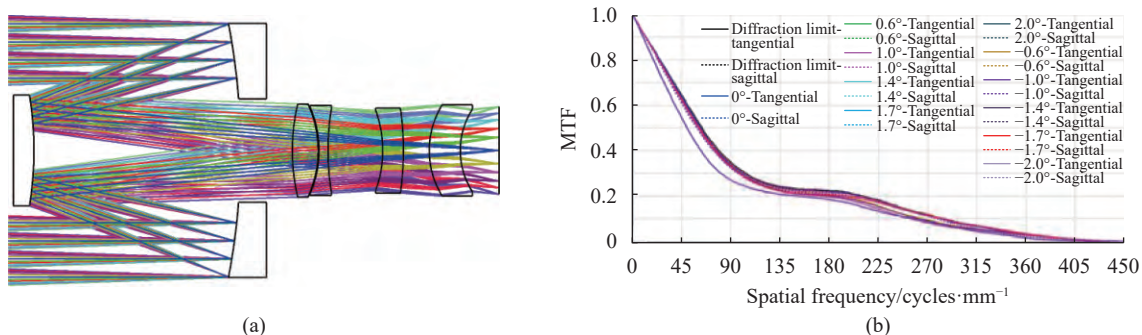


图 6 4°视场包含四片校正镜的折反光学系统。(a) 布局图; (b) MTF 图

Fig.6 A catadioptric optical system with four correcting mirrors in a 4° field of view. (a) Layout diagram; (b) MTF diagram

限成像。通过分析,此时光学系统的球差未得到充分的校正,可以通过将一个透镜面设置为偶次非球面的方法来提高成像质量,使 MTF 接近衍射极限。通过寻找最佳非球面的方法,设定校正组中距离像面最远的第一片透镜的前表面为六阶偶次非球面,再次进行

像质优化,优化后光学系统的成像质量良好,MTF 接近衍射极限,至此降敏设计流程中的第(2)步流程完成,将所获得的光学系统命名为“系统 1”作为降敏优化的起点,进入后续的降敏设计流程。“系统 1”的布局图和 MTF 图如图 7 所示。

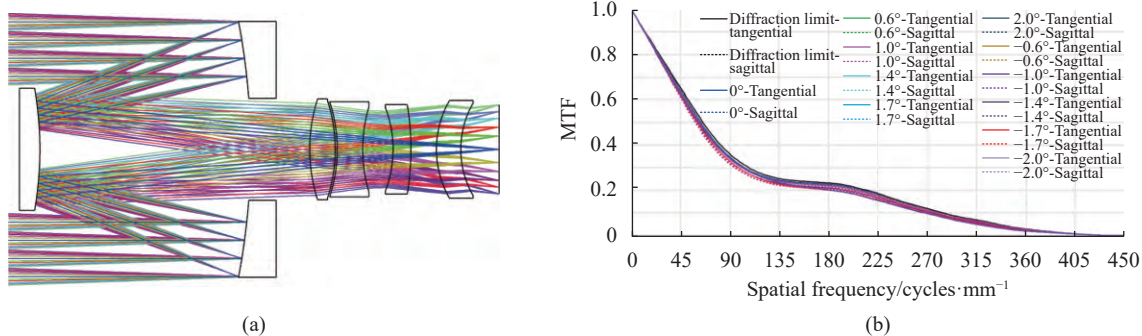


图 7 完成像质优化的光学系统-“系统 1”。(a) 布局图; (b) MTF 图

Fig.7 Optical system optimized for image quality – “System 1”. (a) Layout diagram; (b) MTF diagram

2.2.3 误差敏感度评价与降敏优化

在降敏设计中,为了设定该系统的误差敏感度判断阈值 E_V ,随机生成了 1000 个满足技术指标要求且像质良好的光学系统,对这些系统进行误差敏感度统计,发现误差敏感度 E_V 分布于 (0.253,0.500) 之间,为了获取误差敏感度优于系统自动设计的结果,设定目标设计的误差敏感度判断阈值 $E_V=0.240$ 。

对“系统 1”进行误差敏感度评价函数构建,光学系统由主镜、次镜、四个校正透镜的前后表面组成,因此误差敏感度评价函数中的光学表面数 $n=10$;对 $2\omega=4^\circ$ 视场对称地选择了 11 个视场点,分别为 -2° 、 -1.7° 、 -1.4° 、 -1° 、 -0.6° 、 0° 、 0.6° 、 1° 、 1.4° 、 1.7° 、 2° ,因此误差敏感度评价函数中视场数 $m=11$ 。

计算得“系统 1”的综合误差敏感度 $E_{S,F}=0.328>0.240$,不满足阈值 E_V ,因此需要对“系统 1”进行误差敏感度优化。

降敏优化不是一蹴而就的,将“系统 1”降敏优化设计过程分为三个阶段,第一阶段设定误差敏感度目标为 0.300,对系统中所有光学表面的曲率半径和厚度进行优化,获得“系统 2”,“系统 2”的 $E_{S,F}=0.292<0.300$,其结构布局如图 8(a) 所示,MTF 如图 8(d) 所示。接下来将误差敏感度目标设定为 0.250,继续对光学系统进行降敏设计,获得“系统 3”,“系统 3”的 $E_{S,F}=0.250$,其结构布局如图 8(b) 所示,MTF 如图 8(e) 所示。最后将目标设定为小于 0.240 (E_V),再次对系统进行降敏优化,获得最终结果,命名为“系统 4”,“系

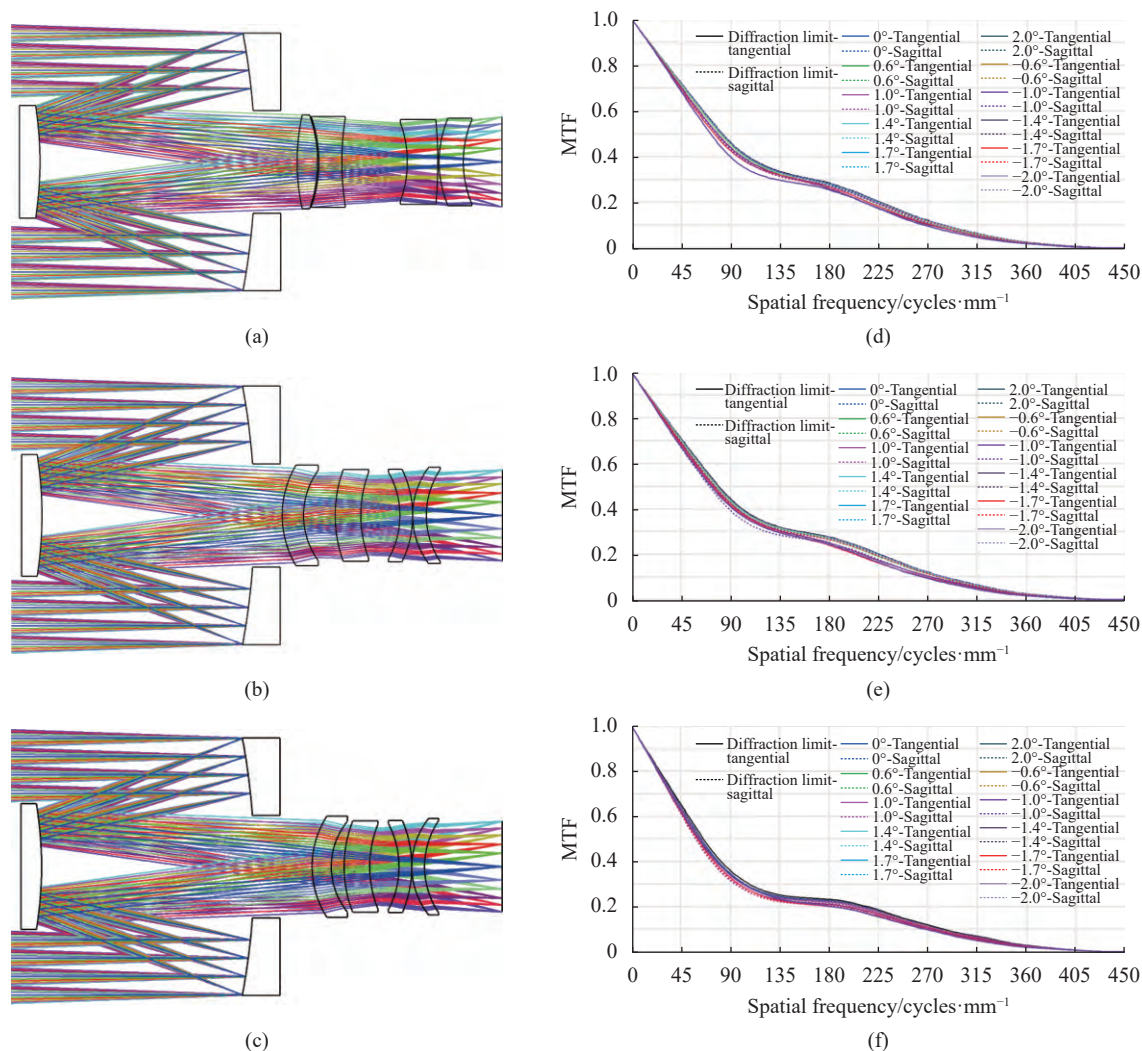


图 8 误差敏感度优化过程中系统布局图和 MTF 图。(a) “系统 2”布局图; (b) “系统 3”布局图; (c) “系统 4”布局图; (d) “系统 2”MTF 图; (e) “系统 3”MTF 图; (f) “系统 4”MTF 图

Fig.8 System layout and MTF diagrams during error sensitivity optimization. (a) “System 2” layout; (b) “System 3” layout; (c) “System 4” layout; (d) “System 2” MTF diagram; (e) “System 3” MTF diagram; (f) “System 4” MTF diagram

统 4”的 $E_{S,F}=0.228$, 其结构布局如图 8(c) 所示, MTF 如图 8(f) 所示。

2.3 误差敏感度分析

误差敏感度优化过程中所获得的四个阶段性结果均具有良好的成像质量, 实现了近衍射限成像。但是根据所提出的敏感度评价函数, 这四个光学系统的 $E_{S,F}$ 数值分别为 0.328、0.292、0.250 和 0.228, 误差敏感度鲁棒性依次增强。

为了验证与展示敏感度评价函数与设计的有效性, 对四个系统进行误差敏感度分析, 采用蒙特卡洛的方法, 样本数量为 1000, 对四个光学系统的每个光学表面施加子午方向倾斜 $\pm 0.01^\circ$ 、弧矢方向倾斜 $\pm 0.01^\circ$

的随机误差, 统计 MTF 的退化情况。“系统 1”、“系统 2”、“系统 3”、“系统 4”的 MTF 蒙特卡洛统计结果分别如图 9(a)~(d) 所示。以空间频率 100 lp/mm 为例进行数据分析, 降敏设计前单纯采用光学设计软件优化获得的“系统 1”在误差扰动下, MTF 有 90% 的概率大于 0.081, 有 50% 的概率大于 0.171, 有 10% 的概率大于 0.293。应用提出的敏感度评价函数与降敏设计方法所实现的“系统 4”在误差扰动下, MTF 有 90% 的概率大于 0.351, 有 50% 的概率大于 0.386, 有 10% 的概率大于 0.406。在误差扰动下, 90% 的概率“系统 4”的 MTF 比“系统 1”高出 0.270。“系统 1”至“系统 4”的 MTF 蒙特卡洛概率统计如图 10 所示。

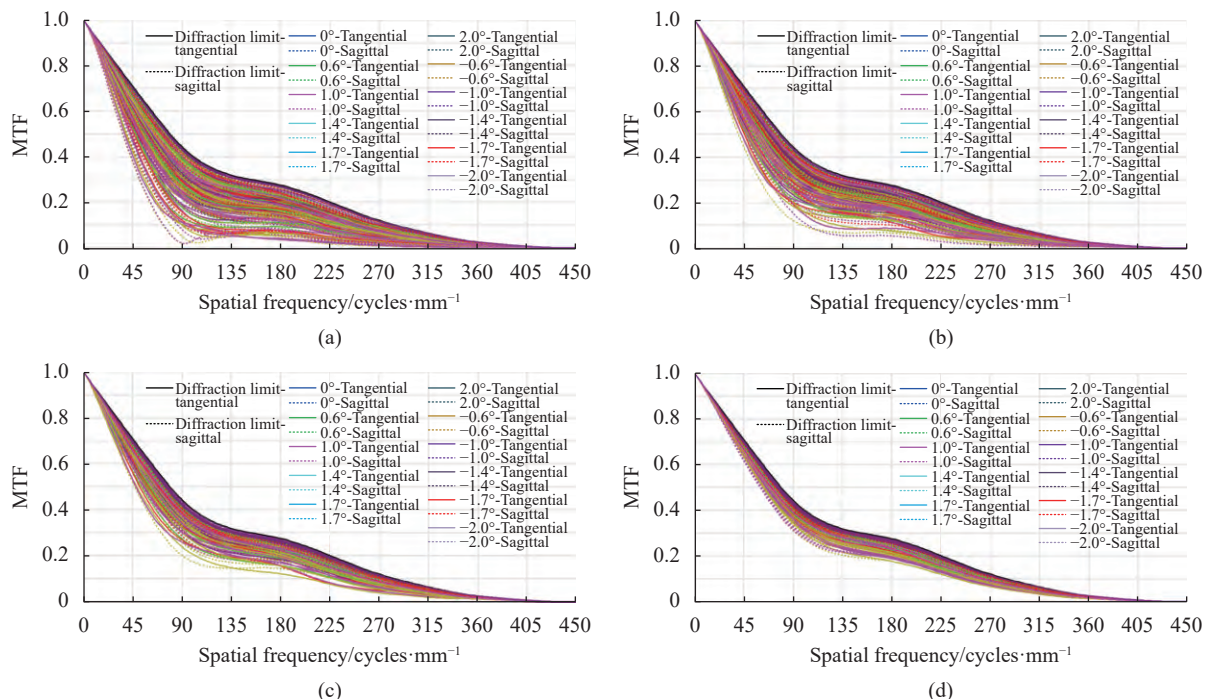


图 9 “系统 1”, “系统 2”, “系统 3”, “系统 4” 的蒙特卡洛分析结果。(a) “系统 1”-降敏优化前的系统; (b) “系统 2”; (c) “系统 3”; (d) “系统 4”-最优系统

Fig.9 Monte Carlo analysis results of “System 1”, “System 2”, “System 3” and “System 4”. (a) “System 1”-The system before desensitization optimization; (b) “System 2”; (c) “System 3”; (d) “System 4”-Optimal system

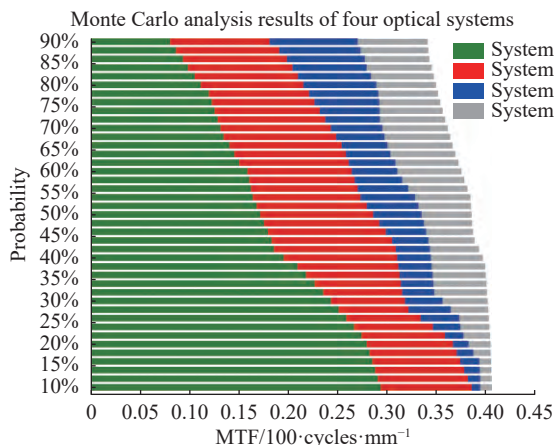


图 10 “系统 1”至“系统 4”的 MTF 蒙特卡洛分析结果图

Fig.10 MTF Monte Carlo analysis result diagram from “System 1” to “System 4”

3 结论

文中以焦距为 500 mm、视场角为 $2\omega=4^\circ$ 的小型空间相机研制为背景,应用光学系统降敏设计方法(低误差敏感度设计方法)对同轴两镜折反射式光学系统进行了设计,结果表明,基于降敏设计方法获得

的光学系统不仅像质良好,MTF 接近衍射极限,而且具备较强的抵抗误差干扰的能力。在相同的误差干扰影响下,降敏优化后的系统(“系统 4”)的 MTF 下降明显小于降敏前的系统(“系统 1”),蒙特卡洛分析结果显示,“系统 1”的 MTF 有 90% 的概率大于 0.081,而“系统 4”的 MTF 有 90% 的概率大于 0.351,“系统 4”的 MTF 比“系统 1”的 MTF 高出 0.270,提升约 4.33 倍。

光学系统降敏设计方法的提出与应用提升了光学系统抵抗误差干扰的能力,可以有力保障高性能小型空间光学相机研制的快速化与低成本化,对空间光学载荷的研制具有重要意义。

参考文献:

- [1] Kuper T, Harris T. A new look at global optimization for optical design [J]. *Photonics Spectra*, 1992, 1: 151-160.
- [2] Kuper T. Global optimization finds alternative lens designs [J]. *Laser Focus World*, 1992, 5: 193-195.
- [3] Forbes G, Jones A. Global optimization in lens design [J]. *Optics & Photonics News*, 1992, 3(3): 23-29.
- [4] Jones A. Global optimization in lens design[D]. Rochester, NY:

- University of Rochester, 1992.
- [5] Sturlesi D, O'Shea D. Global view of optical design space [J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(2): 207-218.
- [6] McGuire J P. Designing easily manufactured lenses using a global method [C]//International Optical Design Conference. International Society for Optics and Photonics, 2006, 6342: 634200.
- [7] Liu X, Gong T, Jin G F, et al. Design method for assembly-insensitive freeform reflective optical systems [J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27798-27811.
- [8] Fuse K. Method for designing a refractive or reflective optical system and method for designing a diffraction optical element: US, 6567226 [P]. 2003-05-20.
- [9] Rogers J R. Using global synthesis to find tolerance-insensitive design forms [C]//International Optical Design Conference, 2006: TuA4.
- [10] Jose Sasian. Lens desensitizing: Theory and practice [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(3): A62-A67.
- [11] Carrión-Higuera L, Calatayud A, Sasian J. Improving as-built miniature lenses that use many aspheric surface coefficients with two desensitizing techniques [J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(5): 051208.
- [12] Isshiki M, Gardner L, Gregory G. Automated control of manufacturing sensitivity during optimization [C]//Optical Design and Engineering. International Society for Optics and Photonics, 2004, 5249: 343-352.
- [13] Isshiki M, Sinclair D C, Kaneko S. Lens design: Global optimization of both performance and tolerance sensitivity [C]//Proceedings of SPIE, 2006, 6342: 63420N.
- [14] Jeffs M. Reduced manufacturing sensitivity in multi-element lens systems [C]//International Optical Design Conference, 2002, 4832: IMC4.
- [15] Zhao Y, Gong F, Hu Y N. Method for reducing tolerance sensitivity of zoom optical system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(7): 121-125. (in Chinese)
- [16] Deng Y T, Jin G F, Zhu J. Design method for freeform reflective-imaging systems with low surface-figure-error sensitivity [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(9): 092201.
- [17] Ma B, Thompson K P, Sharma K, et al. Applying slope constrained Q-type aspheres to reduce sensitivity of optical systems [C]//Frontiers in Optics, 2012: FTh3E.3.
- [18] Ma B, Sharma K, Thompson K P, et al. Mobile device camera design with Q-type polynomials to achieve higher production yield [J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 17454-17463.
- [19] Thompson K P, Schiesser E, Rolland J P. Why are freeform telescopes less alignment sensitive than a traditional unobscured TMA? [C]//Proceedings of SPIE, 2015, 9633: 963317.
- [20] Fuerschbach K, Davis G E, Thompson K P, et al. Assembly of a freeform off-axis optical system employing three ϕ -polynomial Zernike mirrors [J]. *Optics Letter*, 2014, 39(10): 2896-2899.
- [21] Qin Z C, Wang X D, Ren C M, et al. Design method for reflective optical system with low tilt error sensitivity [J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 43464-43479.
- [22] Wang L R, Sasian J M. Merit figures for fast estimating tolerance sensitivity in lens systems [C]//Proceedings of SPIE, 2010, 7652: 76521P.
- [23] Pan J H. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surface[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 12-13. (in Chinese)
- [24] Meng Q Y, Wang H Y, Liang W J, et al. Design of off-axis three-mirror systems with ultrawide field of view based on an expansion process of surface freeform and field of view [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(3): 609-615.