

环形多反射式可见/短波红外光学镜头设计

邢一臣, 王洋*, 张磊

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了实现可见/短波红外镜头的小型化设计,参考环形多反射结构的光学系统,针对单片多反射系统难以校正色差的问题,设计了一个130万像素的紧凑型双片结构的环形多反射式光学镜头。通过分析遮拦比和光学参数对系统的光学传递函数的影响,确定了系统的最佳遮拦比和光学参数。优化后的光学镜头包含两片透镜,材料选用氟化钙,两片透镜之间产生4次反射,各反射面均为偶次非球面。镜头的工作波段为400~1700 nm,焦距为75 mm,直径为50 mm,遮拦比为0.75,全视场角为6.2°,系统总长为22.7 mm,系统长度与焦距比为0.302。优化后镜头光学传递函数曲线平滑,100 lp/mm处大于0.35,倍率色差小于0.9 μm ,成像质量良好。

关键词 光学设计; 环形多反射式; 可见光; 短波红外; 共口径

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223260

Annular Multireflection Visible/Short-Wave Infrared Optical Lens

Xing Yichen, Wang Yang*, Zhang Lei

School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, Jilin, China

Abstract In order to achieve the miniaturization design of visible/short-wave infrared lenses, referring to the optical system with annular multireflection structure, and aiming at the problem that it is difficult to correct chromatic aberration in a single piece multireflection system, a compact dual piece annular multireflection optical lens with 1.3 million pixels is designed. The optimal obscuration ratio and optical parameters of the system are determined by analyzing their effect on the optical transfer function of the system. The optimized optical lens comprises two lenses made of calcium fluoride, which realize four reflections. Each reflective surface is an even aspheric surface. The proposed lens has a working band of 400–1700 nm, focal length of 75 mm, diameter of 50 mm, obscuration ratio of 0.75, and full field angle of 6.2°. The total length of the system is 22.7 mm, and the system length-to-focus ratio is 0.302. The optical transfer function curve of the proposed lens is smooth, more than 0.35 at 100 lp/mm, and its lateral color is $<0.9 \mu\text{m}$. The imaging quality of the proposed lens is good.

Key words optical design; annular multireflection; visible light; short-wave infrared; common aperture

1 引言

随着探测需求的复杂化,单一的可见光波段成像镜头已经无法满足目前的应用需求^[1]。900~1700 nm的短波红外不仅成像质量高,而且具有很强的抗干扰能力和穿透能力^[2],利用可见光和短波红外成像可以获得更加全面、精准的探测信息^[3-4],可应用于夜视成像、森林火源探测、边防监控等领域。目前成像镜头的搭载平台主要为无人机,这就对光学镜头的小型化设计提出了要求。

2006年fSONA公司改进了Gregory式望远结构,在主、次镜之间使用平面反射镜折叠光路,设计了一款适用于自由空间光通信的多次反射望远系统^[5-6]。Tremblay等^[7]设计了一种基于可见光波段的单片多反折叠超薄镜头,其系统均以氟化钙作为基底材料,但光学系统产生的色差较大。2020年,Piao等^[8-9]设计了工作波长为450~1100 nm、厚度为16.6 mm、焦距为50 mm、全视角为7.66°的单片四反透镜。为了消除系统色差,在系统中添加衍射元件,最终系统的垂轴色差小于3 μm 。

收稿日期: 2022-12-07; 修回日期: 2023-01-04; 录用日期: 2023-01-17; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 吉林省科技发展计划项目优秀青年人才基金(20190103046JH)

通信作者: *wangyang11.17@163.com

本文结合环形多反射式结构,设计了一款口径为 50 mm、厚度为 22.7 mm、焦距为 75 mm 的双片式环形四反射光学镜头,材料选取 CaF_2 , 实现了 400~1700 nm 波段的成像光学镜头小型化设计。

2 环形多反射系统理论基础

环形多反射光学系统如图 1 所示,光线从环形孔径进入,并在多个反射面之间进行反射,可以减小轴向工作距离。环形多反射透镜主要参数有:焦距(F)、视场角(2θ)、环形孔径直径(D)、透镜中心厚度(T)、反射次数(N)、遮拦比(ϵ)、材料折射率(n_s)、光波长(λ),各项参数的关系如下。

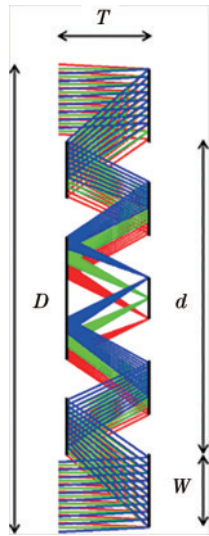


图 1 环形多反射光学系统

Fig. 1 Annular multireflection optical system

透镜中心厚度与反射次数的关系为

$$F = NT/n_s. \quad (1)$$

由于存在中心遮拦,可用 $\epsilon = d/D$ 定义遮拦比表征这种遮拦光作用, d 是遮拦光区域的直径,如图 2 所示。进入光学系统的光能量正比于通光孔径的面积,定义遮拦比与透镜有效孔径的关系为

$$D_e = D\sqrt{1 - \epsilon^2}, \quad (2)$$

式中: D_e 为等效圆形孔径直径,也称作该环形孔径的有效直径。

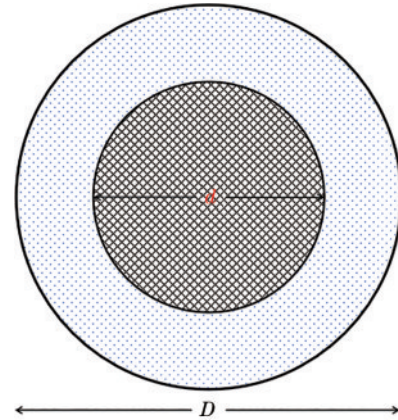


图 2 有效口径与遮拦比

Fig. 2 Effective aperture and obscuration ratio

环形多反射系统遮拦比大小直接影响系统的光学传递函数(MTF),为了确定系统的光学参数和最佳遮拦比,利用傅里叶变换^[10]得到系统的光学传递函数:

$$\text{MTF} = \frac{2}{\pi(1 - \epsilon^2)}(Q_1 + Q_2 + Q_3), \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} Q_1 &= \begin{cases} \frac{1}{2}\pi, \omega = 0 \\ \arccos(\omega) - \omega\sqrt{1 - (\omega)^2}, 0 < \omega < 1 \\ 0, \omega \geq 1 \end{cases} \\ Q_2 &= \begin{cases} \frac{1}{2}\pi\epsilon^2, \omega = 0 \\ \epsilon^2 \cdot \left[\arccos\left(\frac{\omega}{\epsilon}\right) - \frac{\omega}{\epsilon}\sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\epsilon}\right)^2} \right], 0 < \frac{\omega}{\epsilon} < 1 \\ 0, \frac{\omega}{\epsilon} \geq 1 \end{cases} \\ Q_3 &= \begin{cases} -\pi\epsilon^2, 0 \leq \omega \leq \frac{1 - \epsilon}{2} \\ -\left\{ \epsilon^2 \cdot \left[\arccos(q) - q\sqrt{1 - (q)^2} \right] + \left[\arccos(p) - p\sqrt{1 - (p)^2} \right] \right\}, \frac{1 - \epsilon}{2} < \omega < \frac{1 + \epsilon}{2} \\ 0, \omega \geq \frac{1 + \epsilon}{2} \end{cases} \end{aligned} \right. , \quad (4)$$

式中: $p = (1 - \epsilon^2 + 4\omega^2)/4\omega$; $q = (\epsilon^2 - 1 + 4\omega^2)/4\epsilon\omega$; $\omega = \rho/\rho_0$, ρ 为空间频率, 即系统探测器的奈奎斯特频率, ρ_0 为系统的截止频率, $\rho_0 = D/\lambda F$; λ 为工作波长。由式(4)可知, MTF 是一个关于 F 、 D 、 λ 、 ϵ 和 ω 的函数。根据系统的设计参数以及 MTF 要求可计算系统的遮拦比和环形孔径直径。

3 双片四反可见/短波红外镜头设计

3.1 光学结构

单片环形四反式镜头的结构如图 3(a)所示, 这种

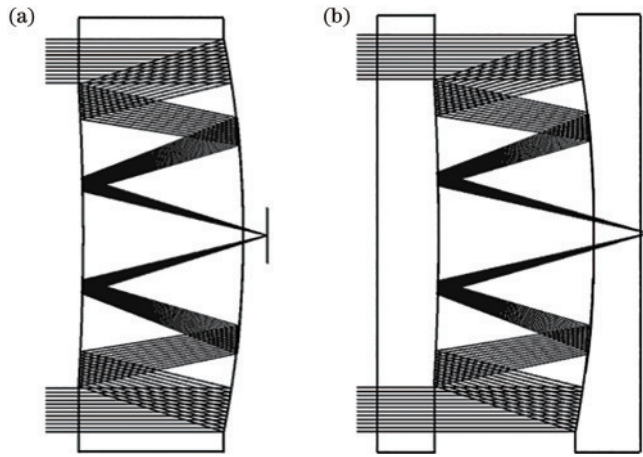


图 3 不同结构。(a)单片式结构;(b)双片式结构

Fig. 3 Different structures. (a) Single-lens structure; (b) dual-lens structure

结构在单一基底材料上加工, 系统的色差较大^[11], 需要加校正器或者采用其他方式校正, 所提设计工作波段为 400~1700 nm, 单片结构无法满足设计需求。

为了解决上述问题, 采用双片结构的四反射式光学结构, 如图 3(b)所示。光线从左侧透镜的平面环带进入, 在两透镜之间进行 4 次反射后从右侧镜片射出。双片式结构内部的各个反射面均在空气中, 系统的前后表面均为平面, 基本不会产生色差。

3.2 材料选取

所设计的可见/短波红外镜头的工作波段为 400~1700 nm, 材料需要满足此波段下的透光性以及尽量大的阿贝数。最终选用氟化钙 (CaF₂) 作为基底进行加工, 主要是因为 CaF₂ 的阿贝数较大、色差较小, 并且 CaF₂ 晶体透光范围宽, 在 0.13~10 μm 波长范围内透光性能良好。

3.3 参数计算

本设计选用 SONY 公司设计的 InGaAs 图像传感器, 型号为 IMX990, 其工作波段 400~1700 nm, 像元尺寸为 5 μm, 分辨率为 1280×1024, 大小为 1/2 inch (1 inch=2.54 cm), 系统的奈奎斯特频率为 100 lp/mm。所设计镜头焦距为 75 mm, 对角线视场为 6.2°。由式(1)可得, 系统的中心厚度为 18.75 mm。由 MTF 在奈奎斯特频率处大于 0.3 结合系统相关参数和式(3), 可得到系统的遮拦比为 0.75, 环形孔径直径为 45 mm。根据式(2)可得到系统的有效口径为 30 mm。综上所述, 系统的设计参数如表 1 所示。

表 1 初始系统光学参数

Table 1 Initial system optical parameters

Parameter	Operation wavelength /nm	Effective focal length /mm	Field of view / (°)	Annular aperture diameter /mm	Obscuration ratio	Total length / mm
Value	400~1700	75	6.2	45	0.75	<30

3.4 初始结构计算及优化

在建立双片多反射结构的初始结构和优化过程中, 同一侧反射表面的中心要重合, 以减小加工难度。同时, 要保证不同表面的反射环带不能重合, 避免出现镜头的内部遮拦。双片多反射结构的光路示意如图 4 所示, 其中, w_i ($i=1, 2, 3, 4$) 代表反射环带。为满足上述条件, 具体要求如下:

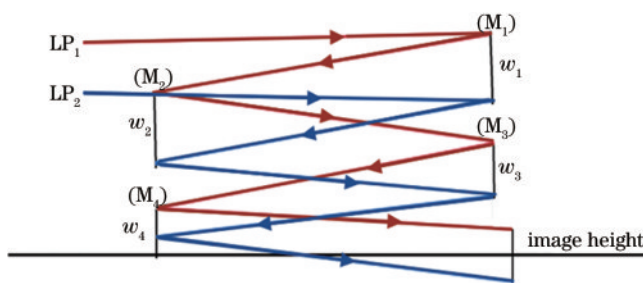


图 4 环形四反光学系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the annular four-mirror optical system

1) 反射环带 w_1 与 w_3 的中心重合, 反射环带 w_2 与 w_4 的中心重合;

2) 在最大视场角时, 为防止内部反射环带重叠, 需要保证环带 w_1 的下边缘高于环带 w_3 的上边缘, 环带 w_2 的下边缘高于环带 w_4 的上边缘, 环带 w_3 的下边缘在像面之上。

综合上述约束条件、系统参数以及 4 次反射系统的像差特性^[12]可得到一组系统的初始结构。各个面的曲率半径分别为: $r_1 = -95.7$ mm、 $r_2 = -66.7$ mm、 $r_3 = -88.1$ mm、 $r_4 = -276.1$ mm。各个面圆锥系数为: $a_1 = -0.9$ 、 $a_2 = 2.8$ 、 $a_3 = -10$ 、 $a_4 = -10$ 。根据上述参数建立初始结构之后进行优化。首先增加入射窗和出射窗, 设定两片透镜的材料为 CaF₂, 系统前后表面均采用平面, 内部折射面采用标准球面, 4 个反射面采用偶次非球面, 控制系统中心厚度、焦距和径厚比等进行优化, 留出加工余量, 最终光学结构如图 5 所示, 系统直径为 50 mm, 厚度为 22.7 mm。

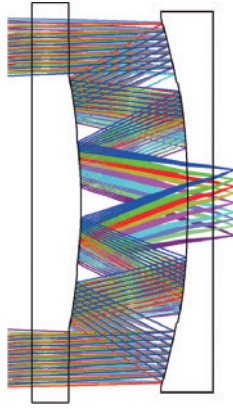


图 5 优化后结构

Fig. 5 Lens after optimization

3.5 像质评价

利用 ZEMAX 优化后,光学系统符合设计要求。镜头的 MTF 曲线图如图 6 所示:在 50 lp/mm 处,全视场 MTF 值均大于 0.55;在 100 lp/mm 处,全视场 MTF 值大于 0.35。

光学系统的点列图如图 7 所示,全视场均方根

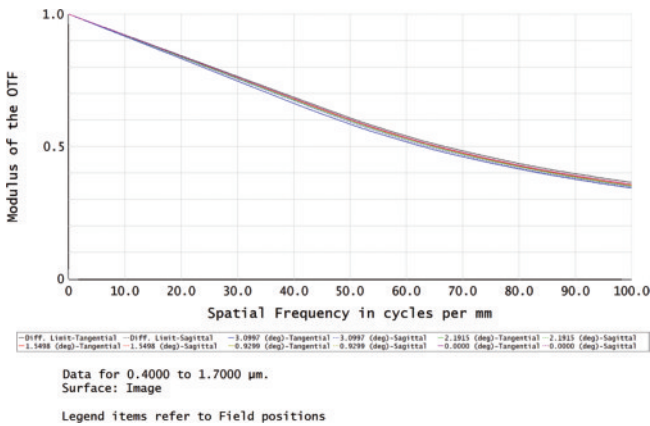


图 6 光学传递函数

Fig. 6 MTF of the lens

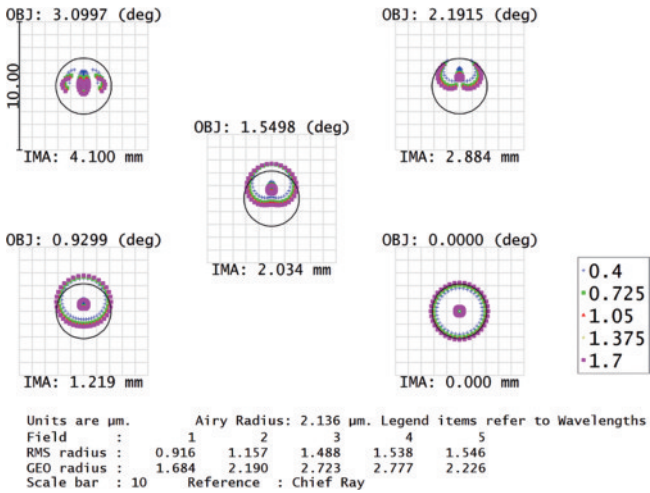


图 7 点列图

Fig. 7 Spot diagram

(RMS)半径均小于 $1.6 \mu\text{m}$ 。因为系统允许的最大弥散斑半径小于等于 1.5 倍 CCD 像元尺寸^[13],本设计选取的传感接收器像元尺寸为 $5 \mu\text{m}$,可以算出允许的最大弥散斑半径为 $7.5 \mu\text{m}$,满足要求。图 8 是系统的垂轴色差曲线,在最大半视场 3.1° 处,其倍率色差约为 $0.9 \mu\text{m}$,小于衍射极限。

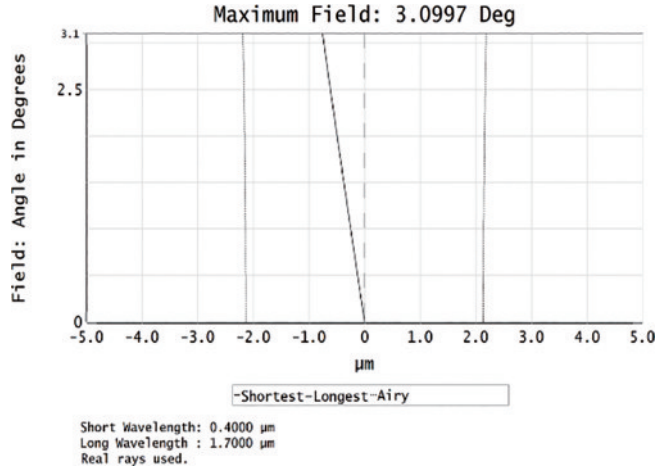


图 8 倍率色差

Fig. 8 Lateral color

4 公差

公差的宽松程度直接决定了系统的加工难度与成本。当各光学元件的偏心公差为 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 、倾斜公差为 $\pm 0.01^\circ$ 、位置和镜片厚度的公差为 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 时,将 MTF 值作为公差敏感度,运用蒙特卡罗分析法进行公差分析。分析结果表明,95% 以上样本的 MTF 优于 0.3。

在上述公差要求范围内,两片透镜利用单点金刚石车削的方法进行加工^[14]。结构设计时,两片透镜装配在一个镜筒里^[15],透镜之间的间隔通过加工一个高精度定位环保证,具体结构如图 9 所示。

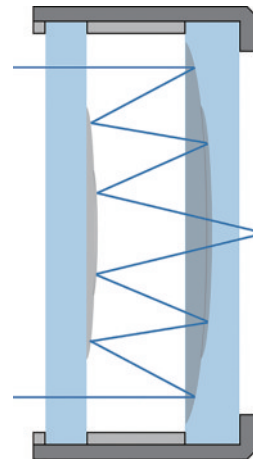


图 9 装配图

Fig. 9 Assembly drawing

5 结 论

在环形多反射光学系统的基础上,设计了一种 4 次反射的双片结构的可见/短波红外镜头,通过多次反射有效减小了系统的总长。镜头的工作波段为 400~1700 nm,焦距为 75 mm,全视场角为 6.2°,最大口径为 50 mm,镜头厚度为 22.7 mm,系统长度与焦距比为 0.302。材料选用 CaF₂。优化后的系统倍率色差为 0.9 μm,MTF 在 100 lp/mm 处大于 0.35,成像质量好。本设计在保证可见/短波红外双波段一体高清晰成像同时,实现了可见/短波红外镜头的小型化设计,适用于一些对工作波段和系统体积、质量有要求的应用场合。

参 考 文 献

- [1] 马占鹏, 薛要克, 沈阳, 等. 可见/红外双色共孔径光学系统设计及实现[J]. 光子学报, 2021, 50(5): 0511002.
Ma Z P, Xue Y K, Shen Y, et al. Design and realization of visible/LWIR dual-color common aperture optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5): 0511002.
- [2] 郭钰琳, 于洵, 蔡珂珺, 等. 可见光/中波红外双波段共口径光学系统设计[J]. 红外技术, 2018, 40(2): 125-132.
Guo Y L, Yu X, Cai K J, et al. Optical design of TV/IR dual-band common-aperture system[J]. Infrared Technology, 2018, 40(2): 125-132.
- [3] 孙婷, 朱海燕, 杨子建, 等. 双波段共孔径相机光学系统设计[J]. 应用光学, 2017, 38(3): 348-351.
Sun T, Zhu H Y, Yang Z J, et al. The design of dual-band common aperture camera optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(3): 348-351.
- [4] 郭帮辉, 孙强, 王志, 等. 300~1100 nm 多波段成像光学系统设计及杂光分析[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(5): 474-479.
Guo B H, Sun Q, Wang Z, et al. Design of 300-1100 nm multiband optical imaging system and its stray light analysis[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(5): 474-479.
- [5] Haney M W. Performance scaling in flat imagers[J]. Applied Optics, 2006, 45(13): 2901-2910.
- [6] 徐乾智, 王洋, 黄蕴涵, 等. 便携多表面反射式望远系统光学设计[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0722001.
Xu Q Z, Wang Y, Huang Y H, et al. Optical design of a portable multi-surface reflective telescope system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0722001.
- [7] Tremblay E J, Stack R A, Morrison R L, et al. Ultrathin cameras using annular folded optics[J]. Applied Optics, 2007, 46(4): 463-471.
- [8] Piao M X, Zhang B, Dong K Y. The design of an achromatic annular folded lens with multilayer diffractive optics for the visible and near-IR wavebands[J]. Optics Express, 2020, 28(20): 29076-29085.
- [9] Zhang B, Piao M X, Cui Q F. Achromatic annular folded lens with reflective-diffractive optics[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 32337-32348.
- [10] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
Lü N G. Fourier optics[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [11] 孟禹彤, 朴明旭, 王琦. 折衍射混合环形孔径超薄成像光学系统设计[J]. 光子学报, 2019, 48(12): 1211003.
Meng Y T, Piao M X, Wang Q. The design of a refractive diffraction hybrid annular aperture ultrathin imaging optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(12): 1211003.
- [12] 常军, 张晓芳, 张柯. 现代反射变焦光学系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
Chang J, Zhang X F, Zhang K. Modern reflective zoom optical system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
- [13] 曹一青, 沈志娟, 张瑞华. 高分辨率大孔径手机镜头设计[J]. 光电子·激光, 2020, 31(6): 600-606.
Cao Y Q, Shen Z J, Zhang R H. The design of a high-resolution mobile phone lens with large aperture[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2020, 31(6): 600-606.
- [14] 魏一. 单点金刚石车削渐进镜面设计方法及其实现[D]. 济南: 山东大学, 2020.
Wei Y. The design method of single diamond turning progressive addition lenses and its realization[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [15] 刘进明, 戴冠林. 数码相机镜筒模具精密件加工工艺设计[J]. 机床与液压, 2013, 41(19): 108-110.
Liu J M, Dai G L. Technology design for precision parts of a digital camera lens barrel mould[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(19): 108-110.