

文章编号: 1672-8785(2023)02-0035-06

轻型折衍混合中波红外变焦 光学系统设计

周 阳 谢佳丽

(江西凤凰光学科技有限公司杭州分公司, 浙江 杭州 310051)

摘 要: 针对 640×512 元制冷型中波红外焦平面探测器, 采用二次成像的光学结构以及机械正组补偿变焦方式, 在设计中引入了硅基衍射光学元件, 从而构成折衍混合变焦光学系统。设计结果表明, 光学系统使用了 7 片镜片, 在 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 波段实现了 $15 \sim 300 \text{ mm}$ 连续变焦, 在空间频率 33 lp/mm 处的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 接近衍射极限。光学镜片的总重量仅有 86 g , 光学系统的总长度为 139 mm 。该系统具有变倍比大、分辨率高、重量轻、体积小等特点。

关键词: 折衍混合; 大变倍比; 连续变焦; 轻型化

中图分类号: O439; TH74 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.02.006

Design of the Light-Weight Hybrid Refractive-Diffractive Medium-Wave Infrared Zoom Optical System

ZHOU Yang, XIE Jia-li

(Hangzhou Branch of Jiangxi Phenix Optics Co., Ltd., Hangzhou 310051, China)

Abstract: Aiming at the 640×512 cooled medium-wave infrared focal plane detector, the optical structure of secondary imaging and the compensatory zoom mode of mechanical positive group are adopted, and the silicon diffraction optical element is used in the design, so as to form the refractive-diffractive hybrid zoom optical system. The results show that MTF is close to the diffraction limit at the spatial frequency of 33 lp/mm . 7 lenses are used in the optical system, and $15 \sim 300 \text{ mm}$ continuous zoom is achieved in the band of $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$. The total weight of the optical lens is only 86 g and the total length of the optical system is 139 mm . The optical system has the characteristics of large multiplier ratio, high resolution, light weight and small size.

Key words: hybrid refractive-diffractive; large zoom-ratio; continuous zoom; light-weight

收稿日期: 2022-10-09

作者简介: 周阳(1991-), 男, 安徽阜阳人, 硕士, 主要研究方向为红外光电系统设计。

E-mail: zhouyang4059@126.com

0 引言

与定焦或双视场红外光学系统相比,连续变焦红外光学系统具有连续可变的焦距。短焦时视场范围大,观测范围广;长焦时探测距离远,分辨率高。在变焦过程中,目标不容易丢失,可对其进行持续的搜索、跟踪和瞄准。随着光学超精密加工、精密机械加工工艺水平的不断进步以及现代科技发展应用需求的不断提高,红外变焦系统向高变倍比、轻小型化的方向发展。

常见的红外连续变焦光学系统多采用折射式光路^[1-2]。由于色差的存在,在设计时需要用负透镜抵消正透镜色差^[3]。但是负透镜的存在会增加正透镜的光焦度负担,从而增大光学系统的单色像差。衍射光学元件具有负向色散和正的光焦度,不仅可以有效校正光学系统色差,而且还分担了一定的光焦度,进而减小单色像差^[4-5]。在中波红外光学系统中,由于能用于加工中波红外镜片材料(硅、锗、硫化锌等)较少且价格昂贵,将衍射光学元件引入并构成折衍混合光学系统,可以减少镜片数量、简化光学系统结构、减轻重量。

由于加工工艺方面的原因,常见的衍射光学元件都是制备在锗、硫化锌等硬度较小的材料上。但是在中波红外波段,由于锗、硫化锌等材料色散系数较大,光焦度一般为负,衍射光学元件的色差校正能力以及光学系统轻量化、小型化的实现会受到影响。硅材料色散系数小、密度小(不足锗的一半)且价格低廉,因此采用硅基衍射光学元件可以有效减轻光学系统重量、压缩光学系统体积。但是硅材料硬度较大,以往工艺难以对其进行加工。近些年来,随着单点金刚石激光辅助等加工工艺逐渐成熟,大口径硅基衍射光学元件的加工成为可能^[6-7]。

本文基于 640×512 元(15 μm)制冷型中波红外焦平面探测器设计了一款轻型连续变焦光学系统。在设计中将硅基衍射光学元件引入并构成折衍混合变焦光学系统。该系统使用了 7

片镜片,在 3.7~4.8 μm 波段实现了 15~300 mm 连续变焦,在空间频率 33 lp/mm 处的 MTF 接近衍射极限。光学镜片的总重量仅有 86 g,光学系统总长度为 139 mm。本文系统具有变倍比大、成像质量优良、重量轻、体积小等特点。

1 设计参数

表 1 列出了本文设计的光学系统的主要技术指标。

表 1 光学系统技术指标

参数	设计指标
像元数	640×512(制冷型)
像元尺寸	15 μm×15 μm
像面直径	12.3 mm
工作波长	3.7~4.8 μm
变倍比	20×
<i>F</i> 数	4.0
焦距	15~300 mm
全视场角	46.7°~2.35°

这种连续变焦光学系统匹配 Lynred 公司生产的 LEO 系列制冷型中波红外探测器。所选探测器的像元数为 640×512,像元尺寸为 15 μm×15 μm,因此可算出像面对角线长度为 12.3 mm,光学系统的传递函数特征频率为 33 lp/mm。在不考虑畸变的前提下,光学系统全视场角(2θ)满足:

$$\tan\theta = \frac{D}{f} \quad (1)$$

式中, *D* 为所用探测器的对角线长度; *f* 为焦距。

光学系统实际上还是会有一定的畸变,所以真实全视场角会与由式(1)算出的理论值有一定的差异。对于连续变焦光学系统而言,一般情况下,短焦时畸变多为枕形畸变(也即负畸变),长焦时畸变多为桶形畸变(也即正畸变)。

对于制冷型探测器,为了避免环境或者镜头本身的红外辐射影响目标的成像效果,冷光阑效率需要达到 100%。设计时需将光学系统光阑(也即出瞳)与探测器的冷光阑重合,这样

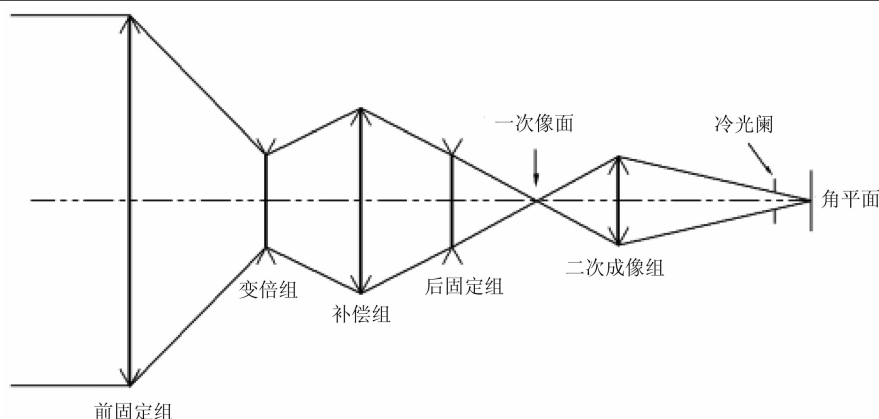


图 1 光学结构示意图

光学系统的 F 数就由探测器的冷光阑大小决定。为了平衡光学系统成像质量和重量、体积等之间的关系, 选择制冷型探测器的 F 数为 4、工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, 实现 $15 \sim 300 \text{ mm}$ 连续变焦以及 $20\times$ 光学系统变倍比。

2 设计思路

2.1 光学结构形式

光学系统采用了二次成像结构。系统中部存在一次像面。光学系统被一次像面分成了前后两个部分: 前部的变焦物镜组和后部的二次成像组。变焦物镜承担系统的变焦功能; 二次成像组将一次像面成像到焦平面上, 同时可以校正前部变焦物镜组的剩余像差并实现光瞳匹配, 从而确保 100% 的冷光阑效率。

变焦物镜采用机械补偿式的双组元变焦系统, 其基本原理是利用变倍组和补偿组两个运动组份的相对运动来实现系统焦距的连续变化, 并且在变焦过程中同时保持像面稳定、像质良好。机械补偿变焦系统分为正组补偿和负组补偿两种形式。其中, 正组补偿能够换根, 从而实现最速变焦。对于长焦距、大变倍比的中波红外光学系统, 采用正组补偿较好^[8-9], 因此本文在选取初始结构时选用正组补偿型变焦系统。图 1 所示为该系统的初始光学结构。

2.2 衍射面

衍射面的相位函数可表示为

$$\Phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda}(A_1 r^2 + A_2 r^4 + \dots) \quad (2)$$

式中, A_1 、 A_2 等为相位系数, r 为径向坐标。

传统光学材料的阿贝数 ν_d 定义为

$$\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} > 0 \quad (3)$$

式中, n_d 为参考波长对应的折射率, n_F 为比参考波长短的波长所对应的折射率, n_C 为比参考波长长的波长所对应的折射率。

衍射面的等效阿贝数 ν_d^B 定义^[8]为

$$\nu_d^B = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_C} = -3.82 \quad (4)$$

式中, $\lambda_F = 3.7 \mu\text{m}$, $\lambda_d = 4.2 \mu\text{m}$, $\lambda_C = 4.8 \mu\text{m}$ 。

与传统光学元件相比, 衍射面等效阿贝数符号相反, 色散大且仅与工作波段相关, 可以有效校正光学系统色差。

对于衍射面而言, 衍射效率是一个关键的性能指标, 会直接影响红外光学系统的能量透过率和成像效果。衍射面的标量理论衍射效率为

$$\eta_m = \left[\frac{\sin\{\pi[m - (\frac{n-1}{\lambda})d]\}}{\pi(m - \frac{n-1}{\lambda}d)} \right]^2 \quad (5)$$

式中, m 为衍射级次, 通常 $m=1$; λ 为工作波长; n 为基底材料的折射率; d 为衍射面的锯齿深度。

一般而言, 光学系统的工作波长具有一定的范围。为了使工作波段内的平均衍射效率最大, 中心波长 λ_d 应满足 $\lambda_d = 2\lambda_C\lambda_F/(\lambda_C + \lambda_F)$ 。此时中心波长的衍射效率最高。根据式(5)可以看出, 衍射面锯齿深度 d 应满足 $d = \lambda_d/(n -$

1)。对于 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 波段的单晶硅 ($n=3.42$) 基底衍射面, 中心波长应为 $4.2\ \mu\text{m}$, 衍射面锯齿深度为 $1.74\ \mu\text{m}$ 。

3 设计结果

3.1 设计实例

根据设计思路以及选定的探测器、焦距、 F 数的要求, 经过多轮优化设计得到图 2 所示的短焦、长焦光学系统光路图。光学系统由两个透镜组(变焦物镜组和二次成像组)共 7 片镜片组成。前组为变焦物镜组, 后组为二次成像组。镜片的总重量仅有 86 g, 光学系统的总长度为 139 mm。

前部的变焦物镜组采用了 4 片镜片, 光焦度按照“+”、“-”、“+”、“-”分布, 材料分别为硅、锗、硅、硫化锌。变焦结构采用了机械补偿式的正组补偿结构。在变焦过程中实现平滑换根。换根点位置位于焦距 220 mm 附近。变倍组与补偿组行程短, 变焦速度快。

后部的二次成像组采用了 3 片镜片, 光焦度按照“+”、“-”、“+”分布, 材料分别为硅、锗、硅, 垂轴方向的放大率约为 2。

二次成像组后面有 1 mm 厚的锗和 0.3 mm 厚的硅组成的保护玻璃。保护玻璃后面是冷光阑, 焦平面位于冷光阑后 20.47 mm 处。

为了校正光学系统的像差从而使成像效果更优, 在设计中引入了 5 个非球面和 1 个衍射面来校正像差。5 个非球面分别位于第二、第三、第四、第五、第七片透镜上。衍射面位于第一片透镜的第二面上, 衍射级次为正一级。该面的曲率半径 R 为 161.45, 衍射相位系数 $A_1 = -4.289 \times 10^{-5}$, $A_2 = 1.137 \times 10^{-9}$ 。

图 3 所示为该衍射面环带分布和径向高度之间的关系。可以看出, 共有 13 条环带, 环带之间最小的周期线宽为 1.48 mm。采用单点金刚石激光辅助加工工艺可以较为容易地实现该衍射面的加工。

3.2 像质分析

MTF 是评价光学系统成像质量时最常用的方法。在连续变焦过程中, 短焦、中焦、长

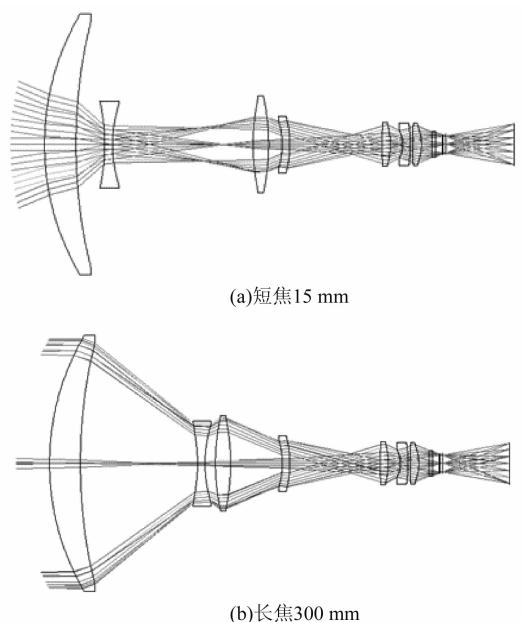


图 2 连续变焦光学系统的光路图

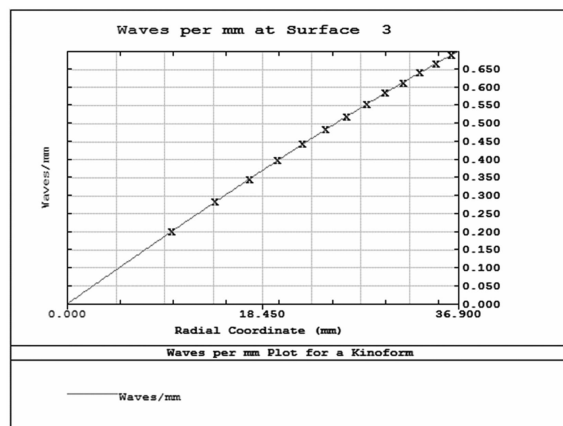


图 3 衍射面环带分布和径向高度的关系

焦时光学系统的 MTF 如图 4 所示。可以看出, 在特征频率 33 lp/mm 处, 短焦、中焦、长焦中心视场的 MTF 值大于 0.26, 0.7 视场的 MTF 值大于 0.23, 边缘视场的 MTF 值大于 0.18, 表明在变焦过程中光学系统像质优良, 系统像差得到较好校正。

畸变是由主光线决定的实际像高和高斯像高之间的差异引起的。虽然畸变不影响光学系统成像的清晰度, 但是会使成像发生变形, 影响物像之间的相似性。因此, 设计时需要控制光学系统的畸变。图 5 所示为光学系统在短焦、长焦时的畸变曲线。系统在短焦时的畸变为 -5% , 长焦时的畸变为 0.7% 。光学系统

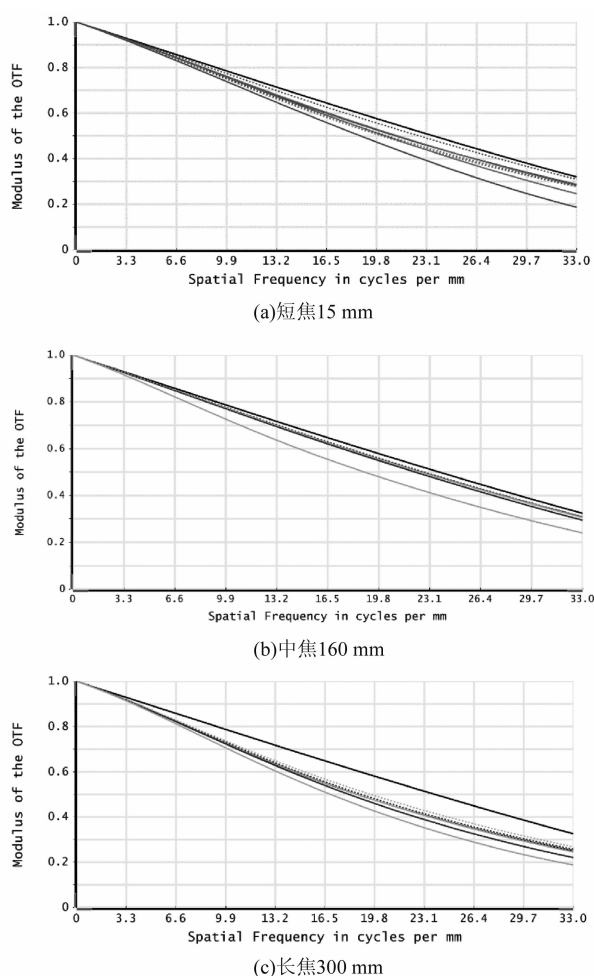


图 4 光学系统在短、中、长焦时的 MTF 的畸变小, 满足使用要求。

3.3 变焦曲线

图 6 所示为光学系统变倍组和补偿组的运动曲线。其中, 纵轴为变倍组和补偿组镜片前

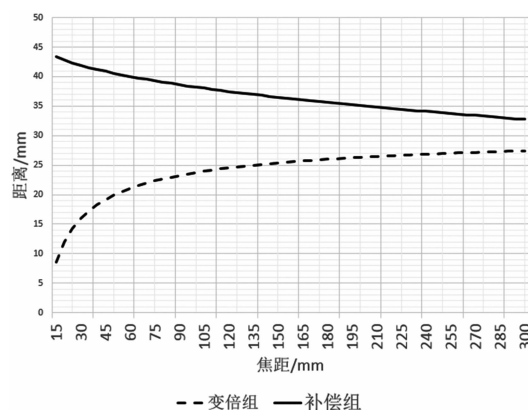


图 6 光学系统变倍组和补偿组的运动曲线

表面中心点到第一镜片第二面中心点的距离, 横轴是相应的焦距。在光学系统由短焦至长焦的变焦过程中, 变倍组的最大行程为 18.8 mm, 补偿组的最大行程为 9.5 mm, 变焦行程短且变焦速度快。由图 6 可以看出, 变倍组及补偿组的运动曲线平滑, 可以有效避免凸轮在变焦过程中出现卡顿等不利影响。

4 结束语

本文基于 640×512 元 ($15 \mu\text{m}$) 制冷型中波红外焦平面探测器设计了一款轻型连续变焦光学系统。该系统采用二次成像的光学结构以及机械正组补偿变焦方式。在设计中将硅基衍射光学元件引入并构成折衍混合变焦光学系统。光学系统使用了 7 片镜片, 在 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 波段实现了 $15 \sim 300 \text{ mm}$ 连续变焦, 在空间频率 33 lp/mm 处的 MTF 接近衍射极限。光学镜片

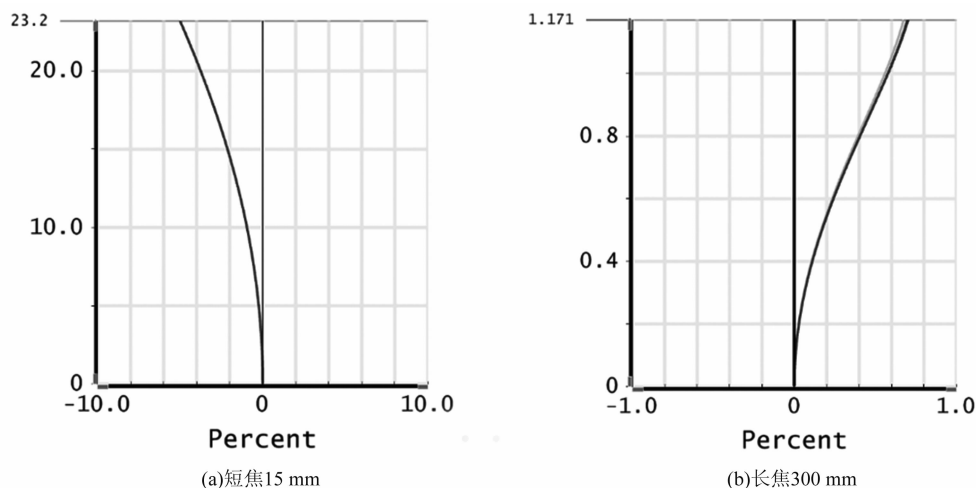


图 5 短、长焦畸变曲线

的总重量仅有 86 g, 光学系统的总长度为 139 mm。该系统具有结构轻巧、成像质量优良、变倍比高、变焦曲线平滑等优点。在接下来的研究中, 我们将尝试采用多组元变焦光学结构, 以期最大限度地实现系统的大变倍比和轻量化。

参考文献

- [1] 葛婧菁, 林招荣, 朱大凯, 等. 机载轻小型中波红外连续变焦系统设计 [J]. *应用光学*, 2013, **34**(5): 728-732.
- [2] 王海涛, 郭良贤. 制冷型中波红外变焦镜头 [J]. *红外技术*, 2007, **29**(1): 8-11.
- [3] 张以谟. *应用光学* (第 3 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [4] 崔庆丰. 用二元光学元件实现复消色差 [J]. *光学学报*, 1994, **14**(8): 877-881.
- [5] 金国藩. *二元光学* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [6] 许剑锋, 黄凯, 郑正鼎, 等. 难加工材料场辅助超精密加工研究 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, **52**(6): 829-853.
- [7] 杜广庆, 谢永军, 张孝林, 等. 轻量化折衍混合中波红外热像仪光学系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(5): 843-846.
- [8] 江伦. 大变倍比长焦距中波红外连续变焦距系统研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
- [9] 李岩, 张葆, 洪永丰. 大变倍比中波红外变焦系统的小型化设计 [J]. *应用光学*, 2013, **34**(2): 215-219.
- [10] Veldkamp W B. Binary Optics [J]. *Sci Am*, 1992, **266**(5): 92-97.