

· 光学设计 ·

高分辨率红外变焦光学系统设计

吴 凡, 李森森

(光电信息控制与安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘 要: 针对1 024×768元长波非制冷式焦平面探测器的应用需求, 设计了一款4×连续变焦高分辨率光学系统, 并利用ZEMAX宏语言编写的宏程序, 对该系统的变焦过程进行了分析。该系统采用机械补偿变焦方式, 在6片锗单晶镜片上设计了3个非球面和1个衍射面, 矫正了高级像差, 实现了在25~100 mm范围内的平滑连续变焦, 视场角可达 $32^\circ \times 24.3^\circ \sim 8.2^\circ \times 6.15^\circ$; 从宏程序输出的变焦凸轮曲线、弥散斑变化曲线和视场畸变变化曲线上看, 该系统在整个变焦过程中运动平滑、成像稳定、弥散斑和视场畸变变化均较小。综合而言, 该系统具有结构紧凑、相对孔径大($F\#1 \sim 1.4$)、视场畸变小、成像质量高、变焦凸轮机构加工难度小, 具有较高的应用价值。

关键词: 变焦距系统; 光学设计; 非制冷焦平面探测器

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-05-0001-04

Design of Infrared Continuous Zoom Optical System with High Resolution

WU Fan, LI Sen-sen

(Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Tianjin 300308, China)

Abstract: A 4× continuous zoom optical system with high resolution is designed for the application of the long wave uncooled focal plane array (FPA) detector with 1 024×768 pixels. The zoom process of the system is analyzed by using a macro program written by ZEMAX macro language. The mechanical compensation zoom mode is used in the system, and there are six pieces of germanium lenses with three aspheric and one diffractive surface. The high order aberrations is well corrected and the system can zoom smoothly and continuously in the focus length range of 25~100 mm with the viewing angle from $32^\circ \times 24.3^\circ$ to $8.2^\circ \times 6.15^\circ$. From the zoom cam curve output from macro program, diffuse spot curve and field distortion curve, it can be seen that the system runs smoothly in the whole zoom process with a high-quality stable image, the various of the diffuse spot and the field distortion is small. In conclusion, the system has the advantages of compact structure, large relative aperture ($F\#1 \sim 1.4$), small field distortion, high image quality, and easy to manufacture the zoom cam mechanism, and has high application value.

Key words: zoomed optical system; optical design; uncooled focal plane array (FPA)

红外成像系统以其自身的优势, 不会被对方电子干扰, 隐蔽性好、图像直观、易于观察、精度高、低空探测性能好等优势, 在警戒、侦察、边防海防等军事领域中得到了广泛应用。近年来, 随着红外光学技术特别是焦平面工艺的不断进步, 非制冷探测器有了长足的发展, 因其具有便于携带、功耗造价低、可靠性好等优点, 愈来愈广泛地应用在红外成像系

统中, 成为新增热成像市场的核心要素^[1-2]。综观主要非制冷探测器生产厂商的技术发展情况, 像元尺寸不断减小, 主流非制冷红外焦平面探测器的像元尺寸从最初的50 μm左右, 历经45 μm、35 μm、25 μm、20 μm等几种规格, 目前已经逐渐进入以17 μm为主流的年代, 且更小像元尺寸如15 μm、12 μm也已进入实质性的研制和试生产阶段^[3]; 面阵规模不断增大,

收稿日期: 2017-08-02

作者简介: 吴凡(1977-), 男, 河南商城人, 硕士, 高级工程师, 主要从事光学系统设计方面的研究工作。

640×480或640×512分辨率已成为主流配置,1 024×768及更大面阵规模如200万像素的探测器也已开始研制及试生产^[4]。

不同于单视场或多视场光学系统,红外连续变焦光学系统由于其在改变视场的同时,像面稳定清晰,在视场转换过程中能够保持图像的连续性,不会发生目标丢失的问题,既可以大视场搜索目标,又可以小视场跟踪目标,广泛应用于国民经济和国防工业的很多领域,其需求日益增强^[5-7]。

根据烟台艾睿推出的1 024×768元像元尺寸14 μm×14 μm非制冷探测器^[8],从实际产品的设计要求出发,根据连续变焦光学系统设计理论,设计出一种焦距为25~100 mm的4×连续变焦红外光学系统,系统F#为1~1.4。采用机械补偿式变焦结构,使用6片锗单晶镜片。在保证变倍比和大光圈的前提下,提高了系统的分辨率,在满足使用要求的同时有效控制了整体成本,具有较好的实用性。

1 设计指标确定

文中针对选用的高分辨率非制冷型长波红外探测器对光学系统进行优化设计,综合考虑实际产品的体积、质量、性能、成本等方面的要求,4×连续变焦红外光学系统的设计指标如表1所示。

表1 光学设计指标

参数	数值
工作波段	8~14 μm
变焦倍率	4×
焦距	25~100 mm
F数	1~1.4
透过率	>85%
畸变	<5%
光学总长	≤180 mm
最大镜片尺寸	90 mm

2 光学设计

一般机械补偿变焦光学系统由两个或多个运动组份构成,通过改变各组份之间的轴向移动量来改变系统的焦距,其变倍比 Γ 为

$$\Gamma = \frac{m_2 m_3 \cdots m_k}{m_2^* m_3^* \cdots m_k^*} \quad (1)$$

系统的合成焦距 f' 为

$$f' = f_1' m_2 m_3 \cdots m_k \quad (2)$$

式中, f_1' 为第一组透镜焦距; m_2 、 m_3 、 \cdots 、 m_k 为起始状态时各透镜组的放大倍率; m_2^* 、 m_3^* 、 \cdots 、 m_k^* 为满足放大倍率 Γ 时各组的放大倍率。系统像面的稳定依赖于各个运动组份共轭距改变量的总和为零来实现,由此建立变焦核的运动轨迹方程^[9]为

$$m_3^2(1-m_2^2)dq + (1-m_3^2)d\Delta = 0 \quad (3)$$

式中, dq 、 $d\Delta$ 分别为变焦组和补偿组的微分移动量。

系统要求变倍比为4×,最大镜片尺寸不大于90 mm,F#接近于1,故适宜选用正组补偿的四组元变焦结构形式,即由一个前固定组、一个变焦组、一个补偿组和一个后固定组组成,各组份光焦度依次为+--++。为保证变焦曲线的单调性,将运动组份放大倍率为-1作为运算的起始点,给定计算步长,根据式(3)计算变焦核的运动轨迹,再根据系统要求的焦距范围、相对孔径和外形尺寸确定系统中其余各透镜的光焦度和变焦核的移动范围,并根据材料特性合理地选用光学材料,从而建立系统的初始结构。最后使用ZEMAX光学辅助设计软件进行优化设计。

设计中采取4组6片式结构,前固定组、变倍组、补偿组均为正透镜,后固定组使用3片分离镜片,对前面结构的剩余像差进行了有效优化。系统孔径光阑设置在补偿组镜片上,随补偿组一起运动,这样设计的好处就是能够较大程度的减小头片透镜的尺寸,引起的另一方面的影响就是系统的F#会随着补偿组的运动发生变化,在系统中,焦距值从25 mm向100 mm变化时,系统的F#从1.0变化至1.4。

材料方面,利用锗单晶对8~14 μm长波红外光波有高折射率及低色散的特性,采用6片锗单晶镜片,在满足系统校正像差的前提下有效降低了成本。

系统为了较好的校正系统的像差提高像质,利用了3个偶次非球面和1个衍射面来进行像差平衡,使系统获得较好的像差校正,从而提高系统的成像质量。

3 设计结果分析

光学系统设计在短焦、中焦和长焦三种情况下的结构示意图分别如图1所示。

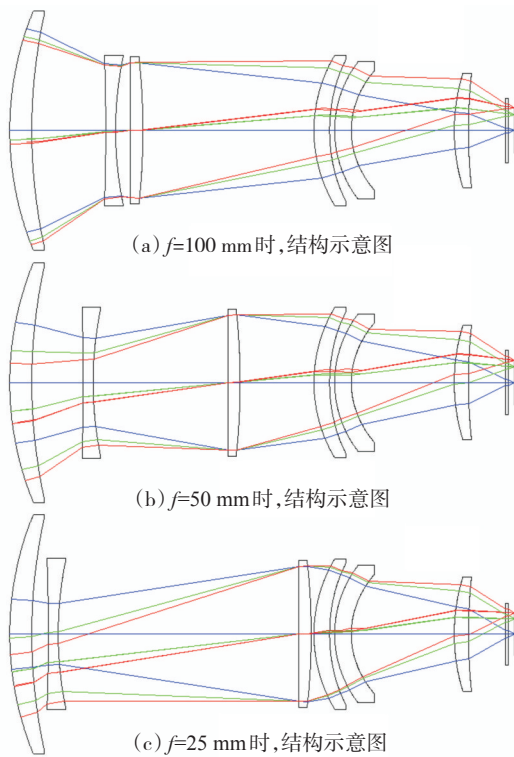
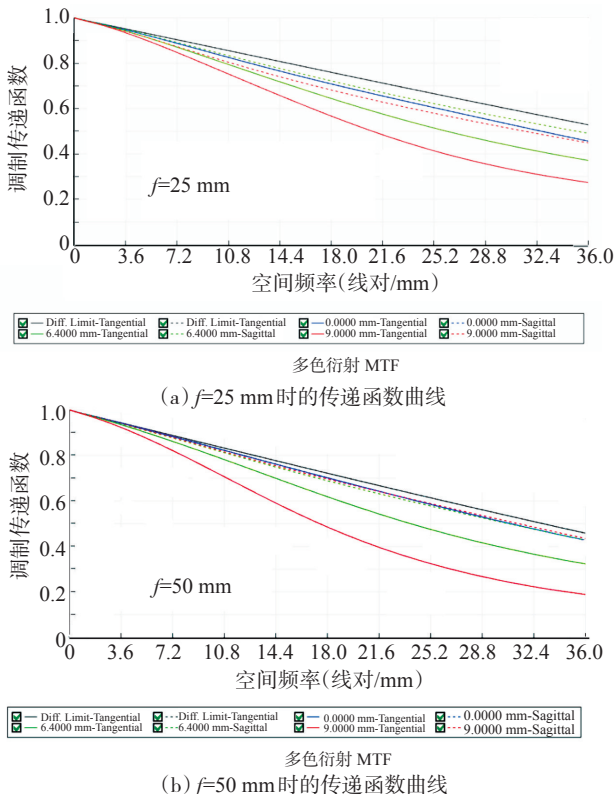
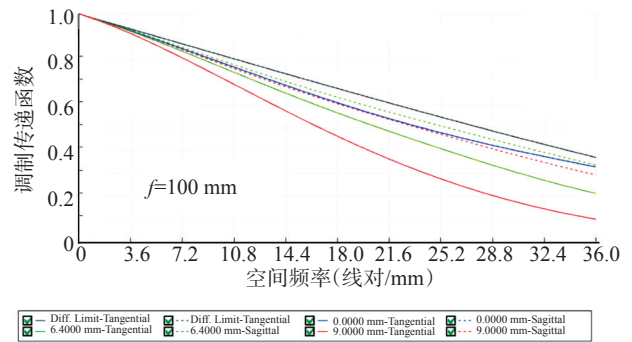


图1 连续变焦光学系统图

调制传递函数(MTF)是光学系统的主要评价手段,连续变焦光学系统短焦、中焦、长焦视场的传递函数曲线分别如图2所示。



(b) f=50 mm时的传递函数曲线



(c) f=100 mm时的传递函数曲线

图2 连续变焦光学系统 MTF 图

在探测器空间截止频率 35 lp/mm 处,各焦距位置上轴上视场传递函数 MTF 值均达到近衍射极限,其他视场的 MTF 值也都达到 0.3 以上,像差得到了较好的校正。

但图2只体现了这3个焦距位置的像差情况,不能反应变焦过程中像差的变化。为了更清楚的掌握变焦光学系统在变焦过程中像差的变化情况,这里利用ZEMAX软件提供的宏语言编写了一个宏程序,计算出了每个焦距位置处各视场的弥散斑(RMS半径值)、视场畸变值和变焦组位置等参数,并将这些参数输出,形成参数变化曲线图。利用该程序就可以直观的看出,该光学系统在变焦过程中的像差变化情况和运动组元的运动情况,直接判定设计结果的好坏。该程序输出的变焦光学系统弥散斑(RMS半径值)变化曲线如图3所示。

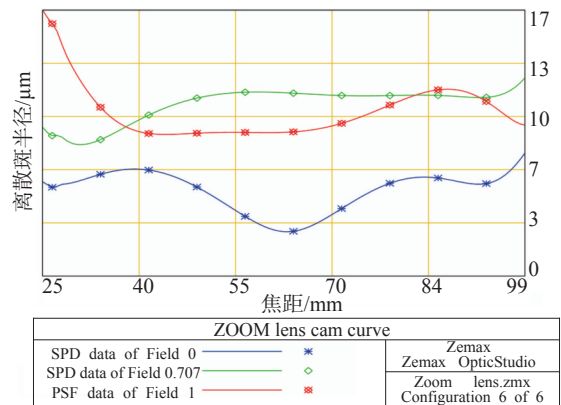


图3 弥散斑直径的均方根值变化曲线

由图3可以看出,在整个变焦范围内,轴上视场弥散斑半径基本上没有超出 7 μm,0.7 视场的弥散斑半径也基本都在 10 μm 以内,表明该系统在整个

焦距范围内的各个视场均有较好的成像质量。可见本设计实现了较高分辨率,能够满足本系统中高清非制冷探测器的匹配要求。

图4所示为该设计系统在焦距变化过程中视场畸变的变化情况。

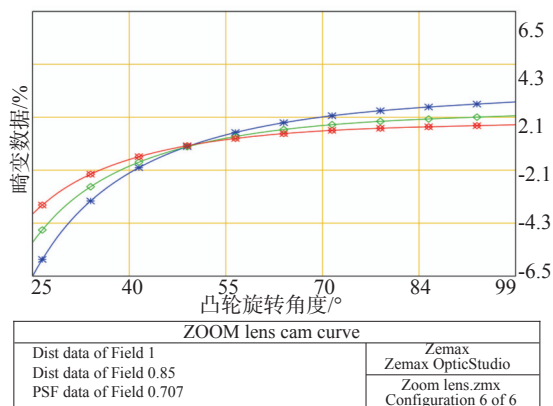


图4 变焦过程中系统畸变变化曲线

由图4可知,该系统的视场畸变在45~100 mm焦距范围内均小于2%,在25 mm焦距时最大也只有5.6%。所以,该设计系统可以很好的应用于红外目标跟踪系统中。

变倍组和补偿组的变焦曲线变焦光学系统的设计必须保证像面的稳定,而变焦曲线的设计对于产品在变焦过程中的像面稳定、像质优劣以及加工装配工艺复杂度有着决定性影响。实际应用中,若变焦凸轮曲线设计不够平滑,在某些位置存在跳变的曲率或极值点,则会增加凸轮机构加工难度,导致系统变焦时不平滑、顺畅,容易卡死^[10]。该设计采用机电系统带动变倍组和补偿组进行非线性移动来实现4×连续光学变焦,并针对其平滑程度进行了优化设计。图5为系统的凸轮曲线与系统焦距的对应关系。

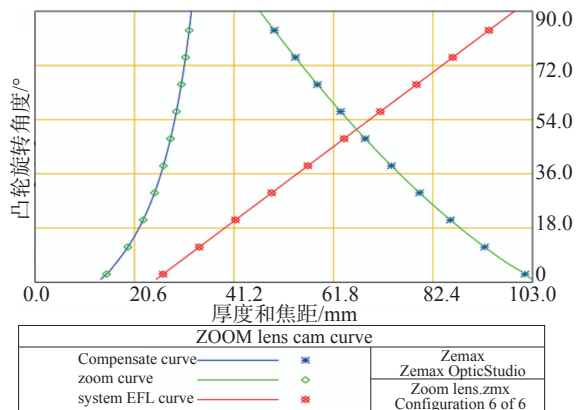


图5 变焦及补偿曲线

图中,纵坐标为凸轮的旋转角度,横坐标为变倍组和补偿组相对于系统原点的运动距离。可以看出,变焦曲线平滑连续,压力角适当,凸轮机构的设计和加工难度小,很容易实现。

4 结论

根据连续变焦光学系统设计理论和实际工程应用的需求,基于1 024×768元非制冷探测器设计了一款高分辨率长波红外连续变焦光学系统。该系统采用6片锗单晶镜片,利用3个非球面和1个衍射面矫正了像差,实现了较高的成像质量,成本相对较低,体积小、质量轻,便于安装携带。采用机械补偿变焦方式,实现了在25~100 mm范围内的平滑连续变焦。视场角可达32°×24.3°(25 mm焦距时)~8.2°×6.15°(100 mm焦距时),视场变换时可实现实时跟踪,适用于追踪高速运动目标。该系统像质优良,视场畸变小,其MTF及点列图数据均接近衍射极限。变焦凸轮曲线经过设计优化,变焦平滑,像面稳定。

作为一款替代制冷型产品的高分辨率红外系统,其特点在于将连续变焦、高分辨率、较低成本几点结合起来,并加以实现。在保证较高的系统性能和产品档次的基础上,尽可能节约了设计、加工、测试和装配上的成本,努力寻求性能和成本上的最佳结合点,在安防、跟踪、侦查、搜索等领域有较高的实用价值。

参考文献

- [1] 冯涛,金伟其,司俊杰.非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态[J].红外技术,2015,37(3):177-184.
- [2] 白丕绩,姚立斌.第三代红外焦平面探测器读出电路[J].红外技术,2015,37(2):89-96.
- [3] LOHRMANN Dieter, LITTLETON Roy, REESE Colin, et al. Uncooled long-wave infrared small pixel focal plane array and system challenges[J]. Optical Engineering,2013,52(6):061305.
- [4] TISSE Christel-Loic, TISSOTB Jean-Luc. An information-theoretic perspective on the challenges and advances in the race towards 12 μm pixel pitch mega pixel uncooled infrared imaging[J]. Proc SPIE, 2012, 8353: 83531M.
- [5] 骆守俊,何伍斌,李文虎,等.大面阵中波红外连续变焦光学系统设计[J].光学精密工程,2012,20(10):2117-2121.

(下转第44页)

- 2010, 5(1): 15-25.
- [5] 张粉英, 张勇. 非线性光学效应及其应用[J]. 物理与工程, 2004, 14(2): 35-39.
- [6] 杜凯. 高品质三元量子点的制备与非线性光学性能研究[D]. 合肥: 解放军电子工程学院, 2014.
- [7] ELLINGSON R J, BEARD M C, JHONSON. Highly efficient multiple exciton generation in colloidal PbSe and PbS quantum dots[J]. Nano Letters, 2014, 5(5): 865-871.
- [8] GARLAND J C, TANNER D B. Electrical transport and optic properties of inhomogeneous media AIP conf[J]. Proc, 1978: 40.
- [9] DU K, MU X Y, YU D B, et al. Synthesis and non-linear optical properties of high quality ternary Cd,Pb_{1-x}Se quantum dots[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(5): 1549-1553.
- [10] HE J, LIU S Y, ZHONG M Z, et al. Two-photon Absorption in ZnO/ZnS core-shell quantum dots[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(2): 250.
- [11] MA Guo-hong, SUN Wan-xin, TANG Sing-hai, et al. Size and dielectric dependence of the third-order nonlinear optical response of Au nano-crystals embedded in matrices[J]. Opt Lett, 2002, 27(12): 1043-1045.
- [12] 杜凯, 王峰, 张金花, 等. 高品质三元 CdSe_{0.5}S_{0.5} 量子点的控制合成和非线性光学性能研究[J]. 材料导报, 2014, 28(23): 214.
- [13] WEI S, SAMPATHI J, GUO Z, et al. Nanoporous PMMA-quantum dots nanocomposite fibers toward biomedical applications[J]. Polymer, 2011, 52: 5817-5829.
- [14] AI Xi-cheng, FEI H Sh, YANG Y Q. Polar enhancement of the nonlinear optical properties of Fe₂O₃ microcrystallites[J]. J Luminescence, 1994(60): 364-367.
- [15] AI Xi-cheng, FEI H Sh, YANG Y Q. Polar enhancement of the nonlinear optical properties of Fe₂O₃ microcrystallites[J]. J Luminescence, 1994(60): 364-367.
- [16] ZHONG J S, XIANG W D, ZHAO H J. Synthesis, characterization and third-order nonlinear optical properties of copper quantum dots embedded in sodium borosilicate glass [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 537: 269.

(上接第4页)

- [6] 张良, 刘红霞. 长波红外连续变焦光学系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1279-1281.
- [7] 贾星蕊, 李训牛, 王海洋, 等. 大变倍比长波红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外技术, 2012, 34(8): 463-466.
- [8] 程伟宁. 中长波共孔径光学系统设计[J]. 光电技术应用, 2016, 31(3): 1-3.
- [9] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 153-163.
- [10] 陈卫宁, 杨洪涛, 刘伟, 等. 变焦凸轮曲线的优化设计方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1535-1539.

(上接第31页)

- A, 2012, 391(3): 834-842.
- [28] WANG S G, YAO H X, ZHENG S. A novel criterion for cluster synchronization of complex dynamical networks with coupling time-varying delays[J]. Commun Nonlinear Sci Numer Simul, 2012, 17(7): 2997-3004.
- [29] Lü L, LI Y, FAN X, et al. Outer synchronization between uncertain complex networks based on back stepping design [J]. Nonlinear Dyn, 2013, 73(1-2): 767-773.
- [30] LENG H, WU Z Y. Cluster synchronization of community network with distributed time delays via impulsive control [J]. Chinese Physics B, 2016, 15(11): 159-166.
- [31] FAN H, ZHAO Y, FENG J. Cluster synchronization in non-linearly coupled impulsive networks with non-identical nodes and time-varying delays[J]. Let Control Theory & Applications, 2016, 10(7): 762-771.
- [32] DONG H, YE D, FENG J, et al. Almost sure cluster synchronization of Markovian switching complex networks with stochastic noise via decentralized adaptive pinning control[J]. Nonlinear Dynamics, 2017, 87(2): 727-739.
- [33] WANG Y, MA Z, CAO J, et al. Adaptive cluster synchronization in directed networks with nonidentical nonlinear dynamics[J]. Complexity, 2016, 21: 380-387.