

## 紧凑型大变倍比红外光学系统设计

曲锐<sup>1</sup>,梅超<sup>1</sup>,杨洪涛<sup>1</sup>,曹剑中<sup>1</sup>,赵延<sup>2</sup>

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119;  
2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所,河南 洛阳 471009)

**摘要:**针对常用变焦结构在实现大变倍连续变焦时存在的各类问题,从变焦系统设计的基本理论出发,提出了一种可用于大变比光学系统设计的两级串联变焦模型,给出了相应的变焦方程及凸轮曲线设计的优化控制条件和方法。该模型由两组元连续变焦前组和具有变焦放大功能的二次成像后组串联组成,通过移动前组中的变焦组与补偿组实现一级变焦;通过移动补偿组与二次成像组中的二级变焦组,对前组焦距进行二级放大,扩大整个成像系统的变焦能力,同时,二次成像组还压缩了物镜口径,保证了冷阑匹配。完成了一个大变比连续变焦光学系统设计,该系统工作波段为 3.7~4.8  $\mu\text{m}$ ,采用 640×480 制冷型面阵探测器,像元大小 15  $\mu\text{m}$ , $F$  数恒定为 4,可以实现 6.5~455 mm、水平视角 0.92°~58.2°、达 70 倍的连续变焦功能,仅采用了两种材料,十片透镜,总长 300 mm,具有优良的成像质量和公差特性。

**关键词:**连续变焦; 大变倍比; 红外技术; 光学设计

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1104002

## Design of compact high zoom ratio infrared optical system

Qu Rui<sup>1</sup>, Mei Chao<sup>1</sup>, Yang Hongtao<sup>1</sup>, Cao Jianzhong<sup>1</sup>, Zhao Yan<sup>2</sup>

- (1. Xi'an Institute of Optical and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;  
2. Luoyang Electro-optical Equipment Research Institute of Aviation Industry Corporation of China, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** In order to solve the problems in high zoom ratio lens design, a two-stage-of-series zoom lens model was proposed based on optics zoom theory. Therefore, differential zoom equations were deduced and solved to help the lens power assignments, also the cam curve optimization condition and method were proved. In this model, first stage zoom was achieved by the two-part-zoom front part, and the given movement pattern of the compensation lens and the second magnified lens determined the second stage zoom, by which the 100% cooled stop efficiency was assured. Based on this method, a 70x MWIR zoom lens under the requirements of  $F/4$ , focal length 6.5–455 mm, HFOV 0.92°–58.2°, work waveband 3.7–4.8  $\mu\text{m}$  was designed, which only used two kinds of infrared materials, consisted of 10 lenses, total length 300 mm, had good image quality and tolerance character.

**Key words:** zoom lens; high zoom ratio; infrared technology; optical design

收稿日期:2017-03-12; 修订日期:2017-04-17

基金项目:中国科学院西部青年学者计划(Y629551213)

作者简介:曲锐(1990-),男,研究实习员,硕士,主要从事光学系统设计方面的研究。Email:qu\_rui@foxmail.com

## 0 引言

两组元变焦光学系统的变倍上限在 50 倍左右,若超过这个量值,变倍组在轴向移动过程中,光线在其透镜表面入射角的变化会导致很大的像差,难以进行校正;采用三组元或更多组元联动的结构可实现更大的变倍比,但在多组联动型系统设计中,变焦盲点的消除及复杂凸轮曲线的设计与加工给工程实现带来较大困难,同时,多组联动的方式也降低了整个成像系统的可靠性。另外,目前应用较多的大变倍比红外连续变焦光学系统的变倍比约为 30 倍,普遍存在变焦行程大、视场切换时间长、变焦过程视轴跳动控制难度大等问题,极大地限制了该类设备的广泛使用<sup>[1-8]</sup>。

针对以上问题,文中从变焦系统设计理论出发,采用两级变倍的设计思想,阐述了一种紧凑型大变倍连续变焦光学系统的实现途径,对于类似大变倍比系统的设计具有借鉴作用。

## 1 设计依据

为了便于论述,文中采用薄透镜理论对所涉及的模型进行描述。

### 1.1 两级串联变倍设计模型

图 1 所示为两级串联变倍设计模型示意图。整个光学系统由两组元连续变焦前组和具有变倍放大功能的二次成像后组串联组成。

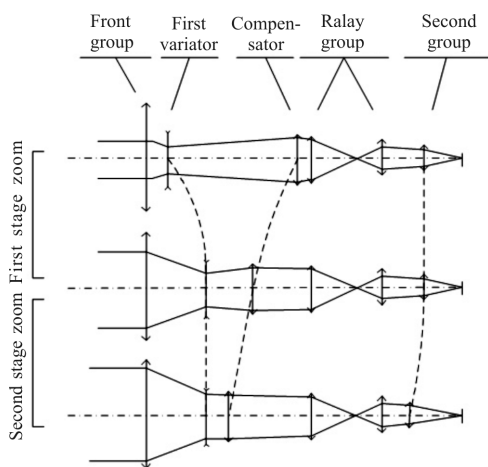


图 1 两级串联变倍设计模型示意图

Fig.1 Schematics of two-stage-of-series zoom lens design model

前组采用传统的两组元变倍结构实现光学系统的一级变倍:整个一级变倍过程,仅有变倍组与补偿组两个动组参与,使用传统的凸轮套筒机构即可满足结构设计要求,保证了系统的可实现性;当变焦至某一位置时,变倍组停止运动,光学系统转入二级变倍:由补偿组与二级变倍组两个组元按照设计好的规律运动,实现对前组焦距的二级放大。此时,通过适当的处理,各动组的运动曲线可与一级变倍过程中的曲线平滑过度,制作于同一凸轮套筒机构上,降低加工及控制难度;二级变倍组的运动可通过单独的凸轮套筒或丝杠导轨机构加以限制,通过合适的控制机制兼具整个光学系统调焦的功能。

由此,通过两级串联变倍的方式,各级变倍过程仅有两个运动组元,提高了整个光学系统的像差校正能力,避免了变焦过程的成像盲点,简化了凸轮曲线的设计过程,为光机结构的实现提供了极大的便利。

### 1.2 变焦方程及参数求解

采用变焦微分方程的方法对两级串联实现大变倍比的设计模型进行描述<sup>[9]</sup>。设计模型中,补偿组参与一、二级两级变倍整个过程,变倍组与二级变倍组分别参与了一级变倍与二级变倍过程,因此,在凸轮曲线的设计过程中,取补偿组为主动组,变倍组与二级变倍组为从动组,并设变倍组焦距为  $f_2'$ ,放大倍率为  $m_2$ ,轴向移动量为  $\Delta_2$ ;补偿组焦距为  $f_3'$ ,放大倍率为  $m_3$ ,轴向移动量为  $\Delta_3$ ;二级变倍组焦距为  $f_4'$ ,放大倍率为  $m_4$ 。

对于一级变倍过程,通过变倍组与补偿组的联动实现,有:

$$\frac{1-m_2^2}{m_2} dm_2 + \frac{1-m_3^2}{m_3} f_3' dm_3 = 0 \quad (1)$$

补偿组为主动组,其放大倍率  $m_3$  的改变是由物距的改变引起,有:

$$dm_3 = \frac{m_3^2 d\Delta_3}{f_3'} \quad (2)$$

变倍组为从动组,其放大倍率  $m_2$  的改变是由像距的改变引起,有:

$$dm_2 = \frac{d\Delta_2}{f_2'} \quad (3)$$

同理,对于二级变倍过程,通过补偿组与二级变倍组的联动实现,有:

$$\frac{1-m_3^2}{m_3^2}f_3'dm_3+\frac{1-m_4^2}{m_4^2}f_4'dm_4=0 \quad (4)$$

在给定初始条件的情况下,采用多种方法求解方程(1)、(4),均可求得一级变倍与二级变倍条件下各组元的光焦度分配及相应的变焦运动曲线,且各组元的运动曲线是分段求解的,保证了曲线的连续性,此处不再赘述<sup>[9-10]</sup>。但分段求解不能保证两级变倍切换时刻,需要单独考虑运动曲线的平滑过度。

以变倍组两段曲线(含一级变倍运动曲线与二级变倍静止直线)的平滑处理为例,为了保证曲线平滑过度,要求变倍级次切换时刻两段曲线斜率相等,即:

$$\frac{dm_2}{d\Delta_3}=0 \quad (5)$$

将公式(2)代入公式(1)可得:

$$\frac{1-m_2^2}{m_2^2}f_2'dm_2+(1-m_3^2)d\Delta_3=0 \quad (6)$$

整理可得:

$$\frac{dm_2}{d\Delta_3}=\frac{m_3^2-1}{f_2'}\frac{m_2^2}{1-m_2^2} \quad (7)$$

式中: $m_2^2 \neq 0$ 。欲使 $\frac{dm_2}{d\Delta_3}=0$ ,必有 $m_3^2-1=0$ ,又考虑 $m_3=1$ 无意义,可知:取 $m_3=-1$ ,即可保证变倍组两级变倍切换时刻的平滑过度。

同理,可以证明:当 $m_3=-1$ 时, $\frac{dm_4}{d\Delta_3}=0$ ,此时可以保证二级变倍组在两级变倍切换时的平滑过度。

另外,为了保证曲线的平滑,还需保证一级变倍过程,变倍组与补偿组的运动曲线平滑连续,即需要保证在 $m_3=-1$ 点时刻,变倍组放大倍率 $|m_2|<1$ 。若以短焦位置为起点,设变倍组与补偿组在短焦位置时的放大率为 $m_{2s}$ 和 $m_{3s}$ ,对公式(1)进行积分求解,可得变倍组倍率

$$m_2=\frac{-b \pm \sqrt{b^2-4}}{2} \quad (8)$$

式中: $b=-\frac{f_3'}{f_2'}\left(\frac{1}{m_3}-\frac{1}{m_{3s}}+m_3-m_{3s}\right)+\frac{1}{m_{2s}}+m_{2s}$ 。

将 $m_3=-1$ 代入公式(8),即可求得变倍级次切换时刻变倍组的放大倍率 $m_2$ ,此时,若发现 $m_2<-1$ ,可通过修改 $m_{3s}$ 或 $m_{2s}$ 的方式对该值进行调整,使其满足 $|m_2| \leq 1$ 。

因此,在两级串联变倍光学系统的设计过程中,对变倍补偿组的放大倍率进行合适的控制,即可保证光学系统各组元运动曲线在两级变倍过程的平滑连续。

## 2 设计实例

选用一个设计实例对上述方法进行说明讨论。设计实例选用 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 中红外制冷型焦平面探测器,像元数为 $640 \times 480$ ,像元尺寸为 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ ,对角线长度为 $12\ \text{mm}$ 。具体设计指标如表 1 所示。

表 1 设计指标

Tab.1 Design requirements

Parameter	Value
Work wavelength/ $\mu\text{m}$	3.7-4.8
F-number	4
Field of view(FOV)/( $^\circ$ )	$0.92 \times 1.2-58.2 \times 73.2$
Effective focal length/mm	6.5-455
Distortion	$\leq 5\%$
Overall length/mm	$\leq 300$

光学系统一级变倍结构采用了正组补偿的形式;具有正光焦度的前固定组为单片式结构,采用了色散能力弱的硅材料,承担主要的光焦度;兼顾大变倍比系统长短焦位置像差的平衡,具有负光焦度的变倍组同样采用了色散能力弱的硅材料,保证变倍组在整个运动过程中,尤其是在短焦位置不会引入太大色差,并压缩光线在后组表面的入射角,降低后组像差校正压力;补偿组采用了典型的三片式结构,由硅-锗-硅按正-负-正的光焦度进行分配,独立校正了镜组的色差、球差、彗差等;中间固定镜组主要起到场镜的作用,压缩光束宽度,减小二次成像镜组体积;二级变倍镜组具有正光焦度,采用了两片式结构,为硅-锗两种材料组合,同样独立消除了镜组内的初级像差<sup>[10-14]</sup>。

采用 CodeV 软件对上述光学系统进行优化分析<sup>[15]</sup>,图 2 即为紧凑型大变倍比中红外连续变焦光学系统优化结果及对应的 MTF 评价。所述系统仅采用了硅、锗两种红外材料,共 10 片透镜,光学系统靠近物方一侧表面至焦面总长 $300\ \text{mm}$ ,单透镜最大口径小于 $120\ \text{mm}$ ,最大变焦行程小于 $112\ \text{mm}$ ,变焦全

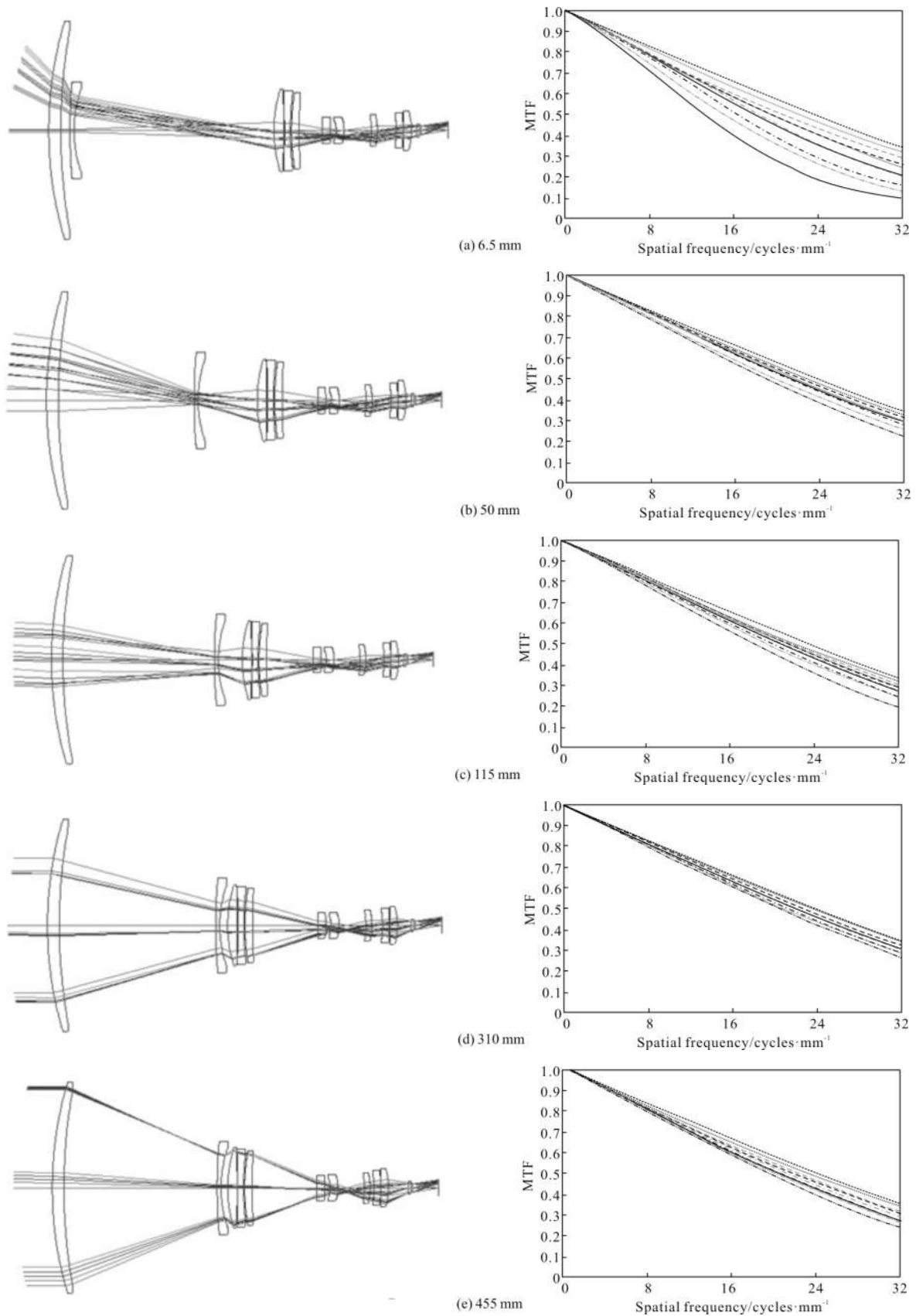


图 2 紧凑型大变倍比中红外连续变焦光学系统优化结果及对应的 MTF 评价

Fig.2 Design result and corresponding MTF performance of the compact high zoom ratio MWIR optical system

程最大畸变小于 5%。

设计完成的光学系统在各焦距位置的截止频率为 33 lp/mm, 中心视场 MTF 均大于 0.28, 各视场的传递函数具有较好的分布, 表明该系统具有较好的成像质量, 证明了上述设计方法的可行性。利用编写的宏程序对所完成的紧凑型大变倍比中红外连续变焦光学系统进行凸轮曲线优化设计, 图 3 为完成优化的变焦系统凸轮曲线示意图, 可以看出, 整个变焦系统变倍补偿过程平滑无拐点。另外, 取各表面反射率为 0.01, 光机结构平均温度 20 °C, 探测场景背景温度 20 °C, 探测器杜瓦内温度 -195.86 °C, 采用冷反射等效温差(Narcissus Induced Temperature Difference, NITD)对上述变焦系统冷反射特性的评价表明: 整个光学系统在短焦位置, NITD ≤ 2.85 K; 在长焦位置, NITD ≤ 0.92 K, 可满足工程应用要求。

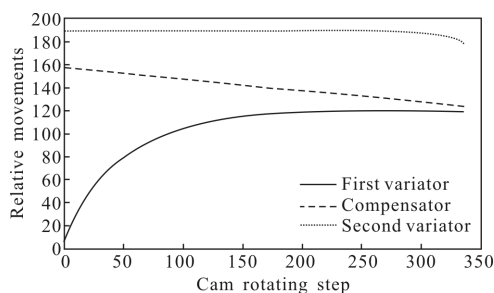


图 3 大变倍比中红外连续变焦光学系统凸轮曲线

Fig.3 Cam curve of large zoom ratio MWIR optical system

公差要求如下: 材料折射率公差 ±0.001, 阿贝数公差 ±0.002; 曲率半径公差 ±0.02 mm; 厚度、偏心公差 ±0.02 mm; 倾斜公差 ±1'。组件与组件之间用镜筒整合, 整合公差: 偏心公差 ±0.02 mm, 倾斜公差 ±1'; 并取二级变倍组作为装调补偿, 此时, 90% 以上概率, 截止频率 33 lp/mm 处, 中心视场 MTF ≥ 0.22, 边缘视场 MTF ≥ 0.17。现有的加工和装调水平完全可以满足该系统的设计要求。

### 3 结论

分析总结了两组元变焦结构在大变倍比光学系统实现中存在的若干问题, 在此基础上, 阐述了一种采用两级变倍结构的大变倍比连续变焦光学系统实现方法, 并就其中各组元光焦度的分配及设计过程中组元运动曲线的平滑处理作了论述, 为大变倍比变焦系统的实现提供了一种新的途径。作为例证, 设

计了一个紧凑型中红外大变倍比连续变焦光学系统。该系统仅使用了硅、锗两种红外材料, 实现了焦距从 6.5~455 mm 高达 70 倍的连续变焦功能, 且该系统体积小、结构紧凑、透过率高, 具有较好的成像质量与公差特性, 可望在预警、观瞄、跟踪、监控等领域获得广泛应用。设计实例同时表明, 该方法可用于类似要求的大变倍比连续变焦光学系统设计。

### 参考文献:

- [1] Ellis I B, James B C, Iain A N, et al. Zoom lens system: US, 6969188 B2[P]. 2005-07-29.
- [2] Neil I A. Optimization glitches in zoom lens design [C]// SPIE, 1997, 3129: 158-180.
- [3] Sinclair R L. High magnification zoom lenses for 3-5 mm applications[C]//SPIE, 2004, 3429: 11-18.
- [4] Aron Y, Boubis I, Shabit R. T. A novel design of a high magnification athermalized 1:30 zoom in the MWIR [C]// SPIE, 2004, 5406: 97-106.
- [5] Hyun Sook Kim, Chang Woo Kim, Seok Min Hong, et al. Compact mid-wavelength infrared zoom camera with 20:1 zoom range and automatic athermalization [J]. *Opt Eng*, 2002, 41(7): 1661-1667.
- [6] Zhou Hao, Liu Ying, Sun Qiang, et al. MWIR continuous zoom optical system with magnification of 45[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, 33(1): 68-77.
- [7] Wang Haiyang, Li Li, Jin Ning, et al. Design of MWIR continuous zoom optical systems with large zoom range[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 398-402. (in Chinese)
- [8] Zhang Liang. Optical design for middle infrared zoom system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27 (1): 32-34. (in Chinese)
- [9] Tao Chunkan. Zoom Focus Optical System Design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988. (in Chinese)
- [10] Lee K H. First-order computation for re-imaging IR optical systems[C]//SPIE, 2003, 5076: 123-129.
- [11] Warren J S. Modern Optical Engineering: the Design of Optical Systems[M]. New York: McGraw-Hill, Inc., 2008.
- [12] Kingslake R, Johnson R B. Lens Design Fundamentals[M]. Burlington: Academic Press, 2010.
- [13] Joseph M G. Introduction to Lens Design with Practical ZEMAX Examples[M]. Richmond: Willmann-Bell Inc., 2002.
- [14] Wang Zhijiang, Gu Peisen. Practical Optical Technology Handbook [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [15] Optical Research Associates. Code V Reference Manual[M]. Pasadena: Optical Research Associates, 2009.