

文章编号 1004-924X(2022)11-1263-09

30倍轻小型变焦光学系统设计

张坤^{1*}, 曲正^{2,3}, 钟兴^{2,3}, 李京宸¹, 张茜¹

- (1. 中国科学院光电技术研究所, 四川成都 610207;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033;
3. 长光卫星技术有限公司, 吉林长春 130102)

摘要:针对机械补偿式变焦光学系统难以同时实现大变倍比和轻小型设计的难题,提出了一种高倍率轻小型机械补偿式变焦光学系统的设计方法。为了降低高倍率变焦光学系统色差和球差的校正难度,对机械补偿式变焦光学系统的光焦度分配原理进行了理论分析。然后,提出采用平滑换根的“+,-,+”光焦度分配方式结合固定光阑口径变 F 数的方法,来实现大变倍比轻小型设计,并通过参数设定和光学设计软件联合解算的方法,快速有效地解算出较佳的初始结构参数。最后,使用球面透镜设计了一款大变倍比轻小型的连续变焦光学系统,该系统的最大口径为67 mm,全长为190 mm。该变焦系统具有成像质量好、变焦曲线无拐点等优点。

关键词:光学设计;变焦光学系统;大变倍比;光焦度分配;轻小型

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20223011.1263

Design of 30× zoom optical system with light weight and compact size

ZHANG Kun^{1*}, QU Zheng^{2,3}, ZHONG Xing^{2,3}, LI Jingchen¹, ZHANG Xi¹

- (1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610207, China;
 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 3. Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd, Changchun 130102, China)
- * Corresponding author, E-mail: zhangkciomp@163.com

Abstract: Developing a lightweight and compact mechanical compensation zoom optical system with a high zoom ratio is challenging. Therefore, this study investigates a design method for a lightweight and compact mechanical compensation zoom optical system with high magnification. First, to simplify the correction of chromatic and spherical aberration in the high magnification zoom optical system, the focal power distribution principle of the mechanical compensation zoom optical system is analyzed theoretically. Then, the “+,-,+” optical focal length distribution method with smooth root exchange and fixed aperture to change the F -number is proposed to realize a lightweight and compact design. In addition, the joint solution method using parameter setting and optical design software is adopted to solve the initial structure parameters quickly and effectively. Finally, a lightweight and compact continuous zoom optical

收稿日期:2021-11-23;修订日期:2022-01-04.

基金项目:知识创新工程领域前沿项目(No. C21K003);中国科学院科研仪器设备研制项目(No. YJKYYQ20210041)

system with a high zoom ratio is designed using spherical lenses based on the proposed design method. The maximum diameter of the zoom optical system is 67 mm, and the total length is 190 mm. In addition, the zoom system is also characterized by good imaging quality and no inflection point in the zoom curves.

Key words: optical design; zoom optical system; high zoom ratio; focal power distribution; light weight and compact size

1 引言

变焦光学系统调节凸轮能够使镜头的焦距连续地变化,从而使被观测物体的成像倍率连续地变大^[1]。因此,变焦光学系统不仅可以对感兴趣的目标进行广域的搜索,而且还能进行精密的跟踪和详细的观察^[2-3]。变焦光学系统在目标跟踪、无人机光电吊舱、安防监测以及摄影等诸多领域都得到了广泛的应用^[4-6]。

变焦光学系统的变焦类型可分为4种:光学式变焦、机械补偿式变焦、双组联动式变焦和全动型变焦。同其他变焦类型相比,机械补偿式变焦光学系统通过改变变倍组和补偿组的相对位置,可以连续地改变整个光学系统的焦距,具有结构简单和研制成本低廉等优点。然而,机械补偿式变焦光学系统已经发展了几十年,却仍然存在大变倍比和轻小型的设计矛盾^[7-9]。2019年,张健等^[10]利用正组补偿结构设计了一款焦距为30~300 mm的机械补偿式变焦光学系统,通过引入非球面和渐晕的方法把整个系统的质量从937 g减小到了584 g,但整个系统的长度仍然高达330 mm,其凸轮曲线也出现了拐点。2020年,刘圆等^[11]设计了一款焦距为50~1 000 mm的机械补偿式变焦光学系统,该光学系统由28片球面透镜组成,最大口径为100 mm,总长为399.9 mm。2020年,刘云鹏等^[12]设计了一款50倍五组变焦光学系统,该系统的第二组元和第三组元是运动组元,第四个组元是一个可替换透镜组元。整个系统结构紧凑,但论文中并没有对该系统是否具有50倍连续变焦的功能进行分析。

为了解决机械补偿式变焦光学系统大变倍比和轻小型设计之间的矛盾,本文对大变倍比变焦光学系统的光焦度分配方式进行了理论分析,并利用平滑换根取段和变 F 数的方法来实现轻小型设计,从而提出了一种大倍率轻小型机械

补偿式变焦光学系统设计方法,使用球面透镜设计了一款焦距为7~210 mm的机械补偿式变焦光学系统,该变焦系统的最大口径为67 mm,全长为190 mm。

2 原理

2.1 大倍率变焦光学系统的光焦度分配

机械补偿式变焦光学系统应用非常广泛,其光学系统仅有两条凸轮曲线,即一条直线和一条曲线。同双组联动型变焦光学系统和全动型变焦光学系统^[12]相比,机械结构更加简单、研发成本更低。然而,机械补偿式变焦光学系统分为负组补偿式变焦光学系统和正组补偿式变焦光学系统两种结构,负组补偿式变焦光学系统的特点是整个光学系统的口径大、长度短,正组补偿式变焦光学系统的特点是整个光学系统的口径小、长度长^[13]。机械补偿式变焦光学系统中,前固定组、变倍组、补偿组和后固定组的光焦度分配有多种形式^[14]。

当密接薄透镜组位于空气中时,透镜组的位置色差和倍率色差分别为:

$$\sum_1^N C_1 = h^2 \sum_1^N \frac{\varphi}{v}, \quad (1)$$

$$\sum_1^N C_{II} = h h_z \sum_1^N \frac{\varphi}{v}, \quad (2)$$

其中: N 为薄透镜组中薄透镜的个数, φ 为薄透镜的光焦度, v 为透镜的阿贝数, h 为透镜的半通光口径, h_z 为主光线在透镜表面上的入射高度。根据式(1)和式(2)可知,变焦光学系统前固定组的口径越大,前固定组的色差越大。为了减小前固定组的色差,前固定组的光焦度越小越好,即焦距越大越好。

负组补偿式变焦光学系统的口径大、长度短。根据式(1)和式(2)可知,光学系统的口径越

大色差越大,色差校正越困难。根据球差方程:

$$\sum_1^N S_i = \sum_1^N h n i (i - i') (i' - u), \quad (3)$$

其中: n 为透镜的折射率, i, i' 分别表示光线的入射角和出射角, u 为第一近轴光线的孔径角。变焦光学系统的口径越大, h 越大,光学系统的球差越难校正。正组补偿式变焦光学系统的口径小、长度长。因此,与负组补偿变焦光学系统相比,正组补偿变焦光学系统对色差和球差的校正能力更强。综上分析可知,在不使用特殊光学元件的时候,正组补偿结构更适合大倍率变焦光学系统设计。

正组补偿式变焦光学系统前固定组的光焦度通常为正值,后固定组的光焦度可为正值也可为负值。当后固定组的光焦度为正值时,为了满足光焦度分配方程,前固定组的正光焦度将变小。由式(1)和式(2)可知,前固定组的光焦度越小,位置色差和倍率色差就越小。因此,后固定组的光焦度为正值的正组补偿式变焦光学系统更有利于色差校正。

综上所述,当机械补偿式变焦系统的前固定组、变倍组、补偿组和后固定组的光焦度分配分别为“+,-,+”时,更有利于大倍率变焦光学系统的像差校正。

2.2 初始结构计算

当机械补偿式变焦系统的前固定组、变倍组、补偿组和后固定组的光焦度分配分别为“+,-,+”时,变焦光学系统的变焦原理如图1所示。从图1可知,机械补偿式变焦光学系统有4个组元,分别为前固定组、变倍组、补偿组和后固定组,各组元对应的光焦度分别为 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 和 φ_4 。当变焦光学系统位于短焦位置时,变倍组距离前固定组最近,补偿组距离后固定组最近。当变焦光学系统逐渐由短焦向长焦变化时,变倍组将逐渐向右远离前固定组,补偿组向左远离后固定组,最后变倍组和补偿组的距离达到最小值,此时光学系统的焦距最长。

在计算变焦光学系统的初始结构时,为了避免相邻组元在运动过程中发生碰撞,相邻组元之间必须留有足够的间距。这里利用高斯光学来计算变焦光学系统的初始结构^[15]。

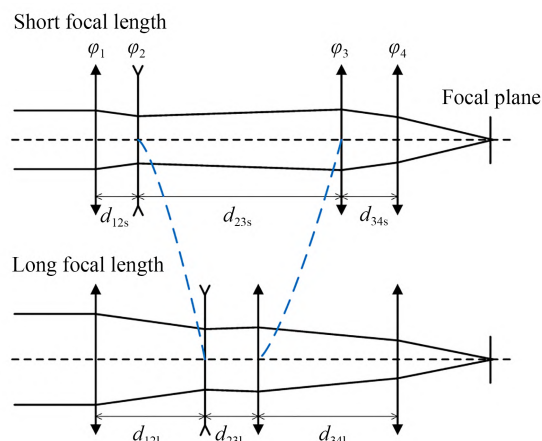


图1 正组补偿变焦光学系统原理

Fig.1 Principle diagram of positive group compensation zoom optical system

在变焦光学系统中,假设变倍组和补偿组的归一化焦距分别为 f'_2 和 f'_3 ,根据长焦距时变倍组和补偿组的归一化倍率 m_{2l} 和 m_{3l} ,可得变倍组与补偿组之间的距离为:

$$d_{23l} = f'_2(1 - m_{2l}) + f'_3 - \frac{f'_3}{m_{3l}}. \quad (4)$$

变倍组从长焦距变化到短焦的总移动距离为:

$$q = d_{12l} - d_{12s}. \quad (5)$$

短焦时变倍组的倍率为:

$$m_{2s} = \frac{1}{1/m_{2l} + q/f'_2}. \quad (6)$$

根据变焦微分方程可得短焦距时补偿组的倍率 m_{3s} :

$$m_{3s} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4}}{2}, \quad (7)$$

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_{2s}} - \frac{1}{m_{2l}} + m_{2s} - m_{2l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right). \quad (8)$$

补偿组从长焦距变化到短焦的总移动距离为:

$$\Delta = f'_3(m_{3s} - m_{3l}). \quad (9)$$

变焦光学系统的总变倍比可表示为:

$$\Gamma = \frac{m_{2l} m_{3l}}{m_{2s} m_{3s}}. \quad (10)$$

当变焦光学系统在短焦时,前固定组和变倍组的距离为 d_{12s} ,补偿组与后固定组的距离为

d_{34s} ,后固定组的倍率为 m_{4s} ,则光学系统前固定组的焦距 f_1' 为:

$$f_1' = d_{12s} + \frac{f_2'(1 - m_{2s})}{m_{2s}}, \quad (11)$$

$$\frac{1}{m_{4s}(l_{3s}' - d_{34s})} - \frac{1}{l_{3s}' - d_{34s}} = \frac{1}{f_4'}, \quad (12)$$

其中: l_{3s}' 表示光学系统在短焦时补偿组的像距。

根据式(7)可知,变倍组的一个位置对应补偿组的两个位置。因此,利用补偿组的这两个位置可以进行换根,变焦光学系统的平滑换根原理如图 2 所示。图中, A_1 - A_2 - A_3 为变倍组的运动轨迹, B_1 - B_2 - B_3 和 C_1 - C_2 - C_3 为补偿组对应的两条运动轨迹。

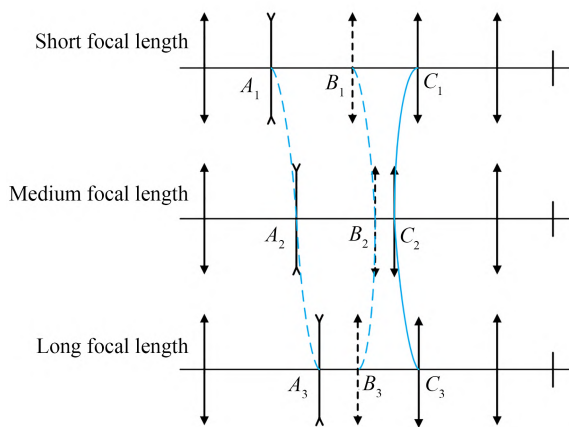


图 2 平滑换根原理

Fig. 2 Schematic diagram of smooth root exchange

若要保证补偿组的运动曲线不出现拐点,必须使补偿组的两条运动曲线相切以实现平滑换根,即在 B_2 和 C_2 处相切。此时,相切处补偿组的放大倍率 m_{3m} 应满足:

$$m_{3m} = -1. \quad (13)$$

平滑换根的补偿组仍然具有两条运动曲线,即 B_1 - B_2 - B_3 和 C_1 - B_2 - B_3 。从 A_1 运动到 A_3 的过程中,变倍组放大率的绝对值一直在增大。从 C_1 运动到 B_2 再运动到 B_3 的过程中,补偿组放大率的绝对值也一直在增大。因此,当补偿组的运动曲线为 C_1 - B_2 - B_3 时,光学系统可实现快速变焦。

综上所述,根据式(4)~式(13)并利用参数设定的方法,可计算出 f_1', f_2', f_3', f_4' 和各组元之间的距离。

3 变焦光学系统设计

3.1 设计指标

光学系统的设计指标与用户使用的要求和所选探测器的参数相关。本文所选探测器的像元尺寸为 $4.8 \mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$,其对应的奈奎斯特频率为 104 lp/mm 。为了满足广域搜索和高分辨率观察的应用需求,变焦光学系统的详细设计指标如表 1 所示。

表 1 变焦光学系统的设计指标

Tab. 1 Design parameters of zoom optical system

参 数	数 值
焦距/mm	7~210
F 数	2.5~4.5
光谱/nm	480~660
全视场/(°)	2.1~61
畸变/%	≤ 3

3.2 光学系统设计

根据 2.2 节可知,式(4)~式(13)属于欠定方程组,因此机械补偿式变焦光学系统的初始结构具有多重解。为了快速有效地解算出较佳的初始结构,本文提出了利用参数设定和光学设计软件联合解算的方法。解算步骤如下:

- (1)为了实现补偿组平滑换根,以变倍组和补偿组的放大倍率为 -1 作为计算的起始状态,假设变倍组的焦距为 -1 ,计算出补偿组的焦距、补偿组与变倍组的物像距离和它们之间的间距;
- (2)设定长焦时变倍组的放大率,求取长焦时变倍组的物距、像距和沿光轴的移动量,再通过变倍比计算出短焦时变倍组和补偿组的放大倍率等参数;
- (3)以起始状态为基准(变倍组和补偿组的放大率为 -1),计算短焦时光学系统的参数;
- (4)选取短焦状态,计算出前固定组的焦距;
- (5)选取短焦状态,设定后固定组的放大率,再计算出后固定组的焦距;
- (6)通过系统参数缩放,获得长焦、中焦和短焦时各组元之间的距离;

(7)把计算出的参数带入光学设计软件中,对系统的光阑位置和 F 数等参数进行优化,并保证光学系统结构紧凑和变焦曲线平滑无拐点。

利用上述计算方法,对 30 倍变焦光学系统的初始结构进行解算和优化,最后得到变焦光学系统中各组元的焦距,如表 2 所示。

表 2 四组元的初始焦距

Tab. 2 Focal length of four groups in initial structure

组 元	焦距/mm
前固定组	85.5
变焦组	-16.2
补偿组	47.0
后固定组	41.3

变焦光学系统的焦距分别在 7,60 和 210 mm 处各组元之间的间距如表 3 所示。

表 3 四组元之间的间距

Tab. 3 Spacing between four groups

组元距离	f/mm		
	7	60	210
d_{12}	20.48	54.98	63.72
d_{23}	113.02	43.63	8.81
d_{34}	23.83	58.76	84.80

变焦光学系统的理想结构模型如图 3 所示。变焦光学系统的总长为 180 mm,孔径光阑位于补偿组前方 1 mm 处。在连续变焦的过程中,孔径光阑与补偿组同步运动,孔径光阑的口径保持不变,光学系统的 F 数会随着焦距的变化不断改变。

从图 3 可知,光学系统的焦距从 7 mm 连续变化到 210 mm 的过程中,变倍组逐渐远离前固定组,补偿组逐渐靠近前固定组。在连续变焦的过程中,两条变焦曲线没有出现拐点。

把表 2 和表 3 中的数据代入光学设计软件中进行透镜替换,经过优化设计得到的变焦光学系统的结构如图 4 所示。变焦光学系统的全长为

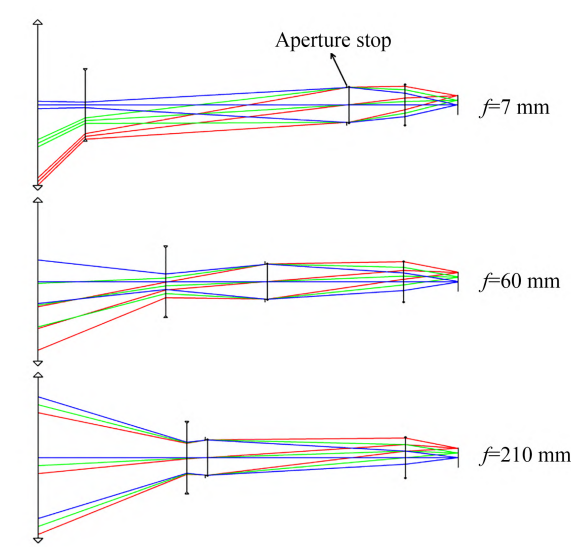


图 3 变焦光学系统的理想模型

Fig. 3 Ideal model of zoom optical system

190 mm,最大口径为 67 mm。

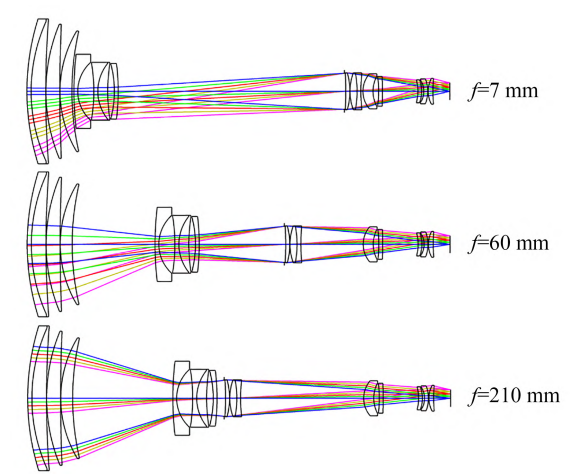


图 4 变焦光学系统结构

Fig. 4 Structure diagram of zoom optical system

4 系统评价与分析

4.1 像质评价

调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF)、点列图和畸变是评价光学系统成像质量的重要指标。MTF 表示光学系统成像的调制度变化情况,通过 MTF 曲线可以比较全面地评价系统的成像质量。图 5 为变焦光学系统的 MTF 曲线,由图 5 可知,当变焦光学系统

的焦距分别为 7, 60 和 210 mm 时, 奈奎斯特频率 104 lp/mm 处全视场的平均 MTF 均大于 0.25。

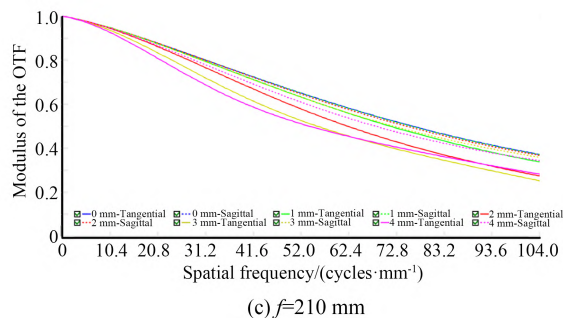
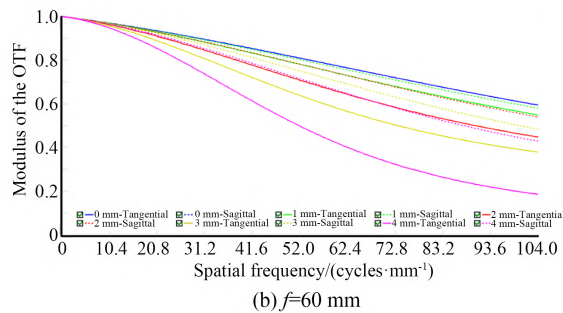
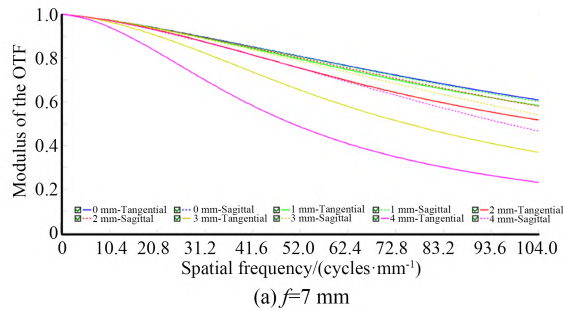


图 5 变焦光学系统的 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curves of zoom optical system

点列图可以比较准确地反应出光学系统成像光线的弥散情况。点列图中的均方根 (Root Mean Square, RMS) 弥散斑半径越小, 光学系统的成像质量就越好。图 6 为变焦光学系统的焦距分别为 7, 60 和 210 mm 时的点列图。

图 7 为变焦光学系统的焦距分别为 7, 60 和 210 mm 时的场曲和畸变曲线。从图 7 可知, 光学系统全焦段的畸变都小于 3%。

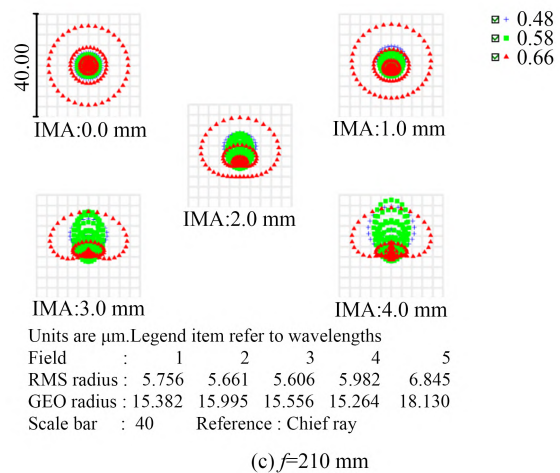
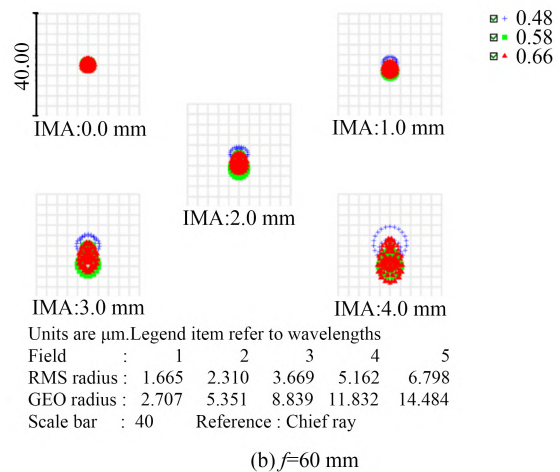
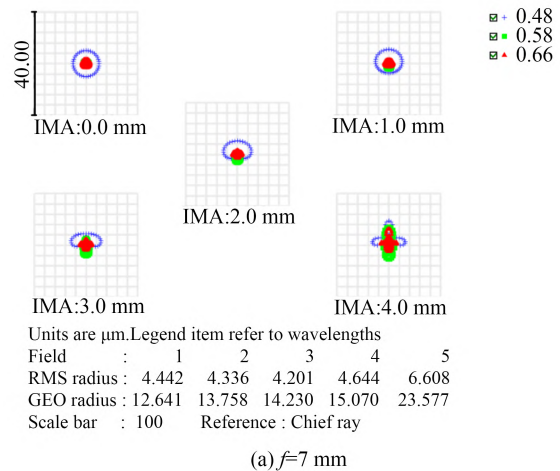


图 6 点列图

Fig. 6 Spot diagram

4.2 公差分析

公差分析是变焦光学镜头加工装配前的重

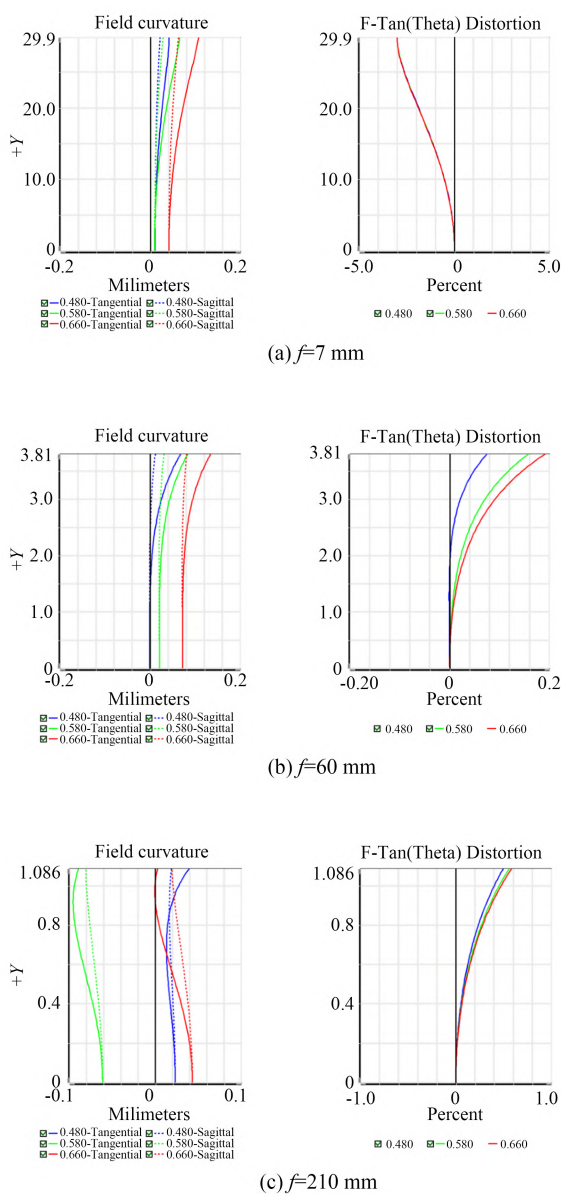


图 7 场曲和畸变曲线
Fig. 7 Field and distortion curves

要分析环节之一,利用光学设计软件中的公差分析功能,可以快速有效地评估出变焦镜头的制造难度。综合考虑变焦光学系统在短焦、中焦和长焦处时各光学透镜的公差灵敏度,最终确定变焦光学系统的公差分配情况,如表 4 所示。

根据蒙特卡洛分析可得,当采用表 4 的分配公差时,变焦光学系统在奈奎斯特频率 104 lp/mm 处全视场的平均 MTF 分布规律如图

表 4 变焦光学系统的公差分配	
Tab. 4 Tolerance distribution of zoom optical system	
公差类型	Value
光圈/fringe	≤ 3
元件厚度/mm	± 0.02
表面偏心/mm	± 0.02
元件倾斜/ $^{\circ}$	± 0.02
元件偏心/mm	± 0.02
表面不规则度/fringe	≤ 0.3
折射率	± 0.001
阿贝数/ $\%$	± 0.5

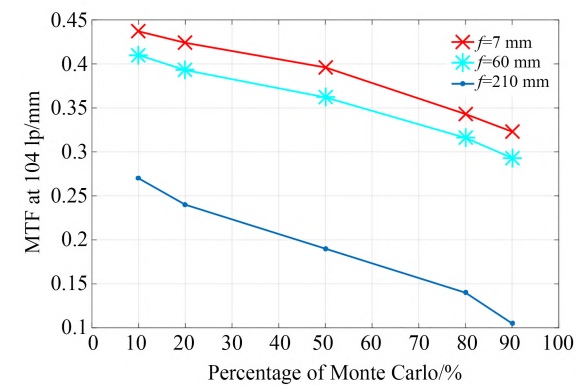


图 8 蒙特卡洛分析概率
Fig. 8 Probability of Monte Carlo analysis

8 所示。蒙特卡洛分析表明,80% 的系统在全焦段内的 MTF 均大于 0.14。

4.3 变焦曲线

在变焦光学系统中,若变焦曲线出现了拐点,极可能会出现变焦卡死的现象。因此,为了能够保证变焦镜头平滑变焦,变焦曲线尽量不要出现拐点^[16-17]。此外,机械补偿式变焦光学系统在变焦曲线设计的过程中,为了降低凸轮的加工难度,一条变焦曲线设计为直线,另外一条变焦曲线设计为高次曲线。

本文的 30 倍变焦光学系统采用变倍组线性运动,补偿组非线性运动的方式进行连续变焦。当变焦镜头的凸轮直径为 50 mm 时,变倍组和补偿组与凸轮旋转角度的变化曲线如图 9 所示。

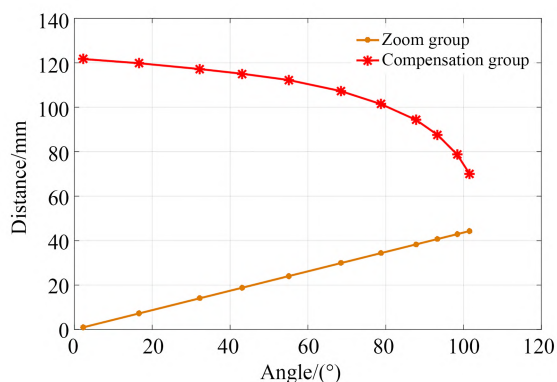


图9 凸轮拟合曲线

Fig. 9 Fitting cam curves

5 结 论

为了缓解机械补偿式变焦光学系统大变倍

比和轻小型设计之间的矛盾,本文提出采用平滑换根的“+,-,+,-”光焦度分配方式,结合变 F 数的方法来实现轻小型设计,并提出利用结构参数设定和光学设计软件联合解算的方法,来合理地分配各组元的光焦度,保证变焦曲线平滑无拐点,从而快速有效地解算出变焦光学系统的初始结构参数,提高光学系统设计的成功率。利用全球面透镜设计了一款焦距为7~210 mm的30倍连续变焦光学系统,可匹配1/2英寸的探测器,该变焦系统的最大口径为67 mm,全长为190 mm,在奈奎斯特频率处全视场的MTF均大于0.25,该系统还具有全视场无渐晕、变焦曲线无拐点、制造成本低廉等优点,在目标跟踪、安防监测等领域具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 杜玉楠,牟达,刘莹莹,等. 20×长波红外变焦光学系统设计[J]. 红外技术, 2013, 35(10): 607-611.
DU Y N, MU D, LIU Y Y, *et al.* Design of 20× long wavelength infrared zoom optical system [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(10): 607-611. (in Chinese)
- [2] JO S H, PARK S C. Design and analysis of an 8× four-group zoom system using focus tunable lenses [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13370-13382.
- [3] MIKS A, NOVAK J. Paraxial analysis of zoom lens composed of three tunable-focus elements with fixed position of image-space focal point and object-image distance [J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27056-27062.
- [4] 马海宽,曹焱,褚东志,等. 应用于海洋监测的水下变焦镜头设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 68-73.
MA H K, CAO X, CHU D ZH, *et al.* Design of underwater zoom lens for marine monitoring [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 68-73. (in Chinese)
- [5] PARK S C, LEE S H. Zoom lens design for a 10× slim camera using successive procedures [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2013, 17(6): 518-524.
- [6] SUN W S, CHU P Y, TIEN C L, *et al.* Zoom lens design for 10.2-megapixel APS-C digital SLR cameras [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): 446-456.
- [7] 贺磊,张建隆,杨振. 6.5倍微小型可见光变焦光学系统设计[J]. 光学仪器, 2019, 41(2): 46-52.
HE L, ZHANG J L, YANG ZH. Design of a 6.5 times microscale continuous visible zoom optical system [J]. *Optical Instruments*, 2019, 41(2): 46-52. (in Chinese)
- [8] 张欣婷,亢磊,吴倩倩. 超高倍变焦光学系统设计[J]. 应用光学, 2018, 39(4): 466-469.
ZHANG X T, KANG L, WU Q Q. Design of ultra-high zoom optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(4): 466-469. (in Chinese)
- [9] 姚清华,闫俊岑. 高变倍比变焦光学系统设计[J]. 应用光学, 2015, 36(5): 667-672.
YAO Q H, YAN J C. Design of zoom optical system with high zoom ratio [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(5): 667-672. (in Chinese)
- [10] 张健,罗天娇,罗春华,等. 30 mm~300 mm轻型变焦物镜光学系统设计[J]. 应用光学, 2019, 40(1): 51-57.
ZHANG J, LUO T J, LUO CH H, *et al.* Optical system design of 30 mm-300 mm light weight zoom objective [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(1): 51-57. (in Chinese)
- [11] 刘圆,叶德茂,王建樞,等. 50 mm~1000 mm大变倍比变焦光学系统设计[J]. 应用光学, 2020,

- 41(6): 1147-1152.
- LIU Y, YE D M, WANG J Y, *et al.* Design of 50 mm-1000 mm zoom optical system with high zoom ratio[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(6): 1147-1152. (in Chinese)
- [12] LIU Y P, YANG B, GU P X, *et al.* 50× five-group inner-focus zoom lens design with focus tunable lens using Gaussian brackets and lens modules [J]. *Optics Express*, 2020, 28 (20) : 29098-29111.
- [13] 陈吕吉, 李萍, 孙琪艳. 20×长波红外连续变焦光学系统设计[J]. *红外技术*, 2012, 34 (8) : 458-462.
- CHEN L J, LI P, SUN Q Y. Design of LWIR zoom optical system with 20: 1 zoom range[J]. *Infrared Technology*, 2012, 34 (8) : 458-462. (in Chinese)
- [14] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
- [15] 闫晶, 刘英, 孙权, 等. 10倍中波红外连续变焦光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51 (1): 161-166.
- YAN J, LIU Y, SUN Q, *et al.* Design of 10 × MWIR continuous zoom optical system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51 (1) : 161-166. (in Chinese)
- [16] 王谭, 袁屹杰, 吴英春, 等. 连续变焦镜头凸轮曲线压力升角优化研究[J]. *电光与控制*, 2021, 28 (1): 61-65.
- WANG T, YUAN Y J, WU Y CH, *et al.* Pressure angle optimization for cam curve of continuous zoom lens [J]. *Electronics Optics & Control*, 2021, 28(1): 61-65. (in Chinese)
- [17] 侯国柱, 吕丽军. 五组元变焦镜头凸轮曲线设计[J]. *红外技术*, 2018, 40(5): 477-480.
- HOU G ZH, LÜ L J. Cam curve design of five component zoom lens [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(5): 477-480. (in Chinese)

作者简介:



张 坤(1993—),男,四川南充人,博士,助理研究员,2016年于西华大学获得学士学位,2021年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航空航天成像光学遥感载荷总体设计方面的研究。E-mail: zhangkciomp@163.com



钟 兴(1982—),男,四川自贡人,博士,研究员,2004年于吉林大学获得学士学位,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为长光卫星技术有限公司副总经理,主要从事光学遥感技术、光学测量与光学导航设备方面的研究。E-mail: ciomper@163.com