

大变倍比光学被动半无热化变焦系统设计

闫阿奇^{1*}, 崔雯^{1,2}, 董森¹¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对传统变焦光学系统在环境温度变化的情况下, 变焦全程无法一致清晰成像以及需频繁调焦的问题, 提出了一种光学被动半无热化变焦系统设计方法, 并设计了一种光学被动半无热化变焦系统。变焦系统的焦距为 30~1000 mm, 工作波段为 486~656 nm, 光圈为 $F_{4.4} \sim F_8$, 短焦采用光学被动无热化设计。变焦系统的成像质量良好, 结构非常紧凑, 在工作温度范围为 $-40 \sim +60$ °C 的情况下, 只需长焦位置调焦一次, 即可保证从长焦到短焦的变焦全程一致清晰成像, 中间过程无需再调焦, 且温度调焦量仅为 $-0.56 \sim +0.82$ mm, 这验证了设计方法的正确性。采用本方法设计的变焦系统既克服了传统变焦系统在不同温度下需频繁调焦的问题, 也极大减小了系统的温度调焦量, 有利于快速调焦。

关键词 光学设计; 光学变焦系统; 光学被动无热化; 像面一致性; 调焦

中图分类号 V439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0422001

Optical Design of Optical Passive Half-Athermalization Zoom Lens with High Zoom Ratio

Yan Aqi^{1*}, Cui Wen^{1,2}, Dong Sen¹¹Xi'an Institute Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In view of traditional zoom lens cannot consistently and clearly image during the whole zoom process when the ambient temperature is changed, which needs to focus frequently at middle focal length position. This paper proposes a new design method which is named optical passive half-athermalization zoom lens design, and an optical passive half-athermalization zoom lens is designed by this novel method. The focal length of zoom lens is 30–1000 mm, spectrum wavelength is 486–656 nm, and F -number is $F_{4.4} \sim F_8$. Most importantly, the shortest focal length position of zoom lens is optical passive athermalization. The optical system has compact structure and excellent imaging quality, and based on method of passive half-athermalization design, optical system at any temperature between -40 °C and $+60$ °C, which only need to focus once at the longest focal length position of zoom lens, that can ensure consistently and clearly image during the whole zoom process. There is no need to focus frequently in any middle zoom position, and the temperature adjustment of zoom lens is only $-0.56 \sim +0.82$ mm, which have verified method of optical passive half-athermalization zoom lens design correctly. According to this method, zoom lens not only overcomes trouble of frequently focusing in traditional zoom lens, but also greatly reduces amount of temperature focusing and benefits on fast focusing.

Key words optical design; optical zoom system; optical passive athermalization; image consistency; focusing

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-07-30; 录用日期: 2021-08-27

基金项目: 中国科学院青年创新促进会资助

通信作者: *yanaqi@opt.ac.cn

1 引言

光学连续变焦系统是一种焦距连续变化、像面位置保持不变且像质优良的光学系统。变焦系统由于焦距可连续变化,已广泛应用于光电吊舱、安防、监控、交通和森林防火等领域^[1-3],能够实现对大视场的搜索与小视场的详查。

传统变焦光学系统,尤其是长焦距、大变倍比的变焦系统在工作温度变化的情况下,温度对光学系统在不同焦距位置处成像质量的影响程度不同,使得变焦全程都无法一致清晰成像,需频繁多次调焦,这既不利于用户的操作与使用,也造成了变焦系统的调焦量过大,无法满足快速对焦的要求。

针对上述问题,可以采用两种方法来解决。1)针对不同温度,选择不同的变倍凸轮廓曲线。采用这种方法的光学系统需包含测温组件,但后期标定工作量巨大,变焦光路结构形式受限,实际效果也不理想,目前很少采用。2)光学被动无热化变焦系统,由于其进行了光学被动无热化的设计,故可以解决上述问题,但其设计难度太大,设计过程繁琐,镜片数量多,光学系统结构非常复杂。相对于普通变焦系统,光学被动无热化变焦系统的外形尺寸、体积和质量急剧增大,无法满足变焦系统小型化和轻量化的要求。

鉴于此,本文提出了一种光学被动半无热化变焦系统设计方法,该方法既解决了传统变焦系统在工作温度变化的情况下变焦全程无法一致清晰成像以及需频繁调焦的问题,便利了用户的操作与使用,极大地减小了调焦量,有利于快速对焦以及提高调焦精度;又可保持变焦系统的小型化和轻量化,克服光学被动无热化变焦系统的设计难度大、系统体积大和质量大等缺点,本方法设计的变焦系统的体积和质量与传统变焦系统无明显差异。

2 光学被动半无热化变焦系统设计方法

传统的光学系统被动无热化设计是为了避免温度变化对光学系统成像质量的影响,本文所提出的“光学被动半无热化变焦光学系统”是相对于光学被动无热化变焦系统而言。光学被动无热化变焦系统实现了温度离焦的被动补偿,变焦系统在任意焦距位置处均实现了光学被动无热化设计。具体而言,变焦系统的成像清晰度在任意焦距位置、任何工作温度范围下均不会受到温度变化的影响,或者说光学系统的温度离焦量在任意焦距下均小于该焦距位置处光学系统的焦深,系统变焦全程无需采取调焦

措施,即可保证成像的清晰度。

光学被动半无热化变焦光学系统仅在个别焦距位置处实现光学被动无热化设计,变焦全程为了保证其他焦距位置处光学系统的成像清晰度,仅需在长焦位置调焦一次。

光学被动半无热化变焦系统介于传统变焦系统与光学被动无热化变焦系统之间,半无热化变焦光学系统虽然无法在任意焦距位置下均为光学被动无热化,但其显著降低了变焦全程的温度调焦频率。当温度变化时,光学被动无热化变焦系统无需任何调焦,即可保证变焦全程成像的清晰度;光学被动半无热化变焦系统仅需在长焦位置调焦一次,即可保证变焦全程成像的清晰度;传统变焦系统在变焦全程需要频繁多次调焦。

光学被动半无热化变焦光学系统在工作温度范围内的任何温度下,仅需在长焦位置调焦一次,就可保证从长焦到短焦的变焦全程一致清晰成像,中间过程无需再调焦。

在光学系统设计阶段,根据变焦光学系统的结构形式、调焦组的所处位置及其调焦大小对变焦系统长、短焦成像质量的影响程度,合理控制光学系统的设计参数,分析敏感透镜的成像规律并合理更换光学材料,从而实现变焦光学系统的光学被动半无热化设计。本方法适用于前组为调焦组的情况,变焦光学系统的半无热化设计方法如图1所示。

变焦系统中的前组为调焦组,由于前组对短焦像质的影响不明显,但对长焦像质非常敏感。为了实现变焦系统的光学被动半无热化设计,除了光学系统的调制传递函数(MTF)满足要求外,变焦系统的短焦应进行光学被动无热化设计,使短焦像质对温度变化不敏感。

短焦系统的光学被动无热化设计可通过增加温度多重结构,并与变焦系统在其他焦距位置处同时优化来实现,也可在充分分析变焦系统中对短焦像质以及温度特性影响较大的变焦组元(变倍组、补偿组和固定组等)以及敏感透镜,通过更换组元内敏感透镜的光学材料来实现。

更换光学材料的主要方式有两种:1)将敏感透镜所使用的普通光学材料更换为线膨胀系数大或者温度折射率较大的材料;2)将敏感透镜或者敏感组元内其他透镜所使用的线膨胀系数大或者温度折射率较大的光学材料,更换为普通线膨胀系数小或温度折射率较小的光学材料。具体选择哪个透镜进行光学材料的更换,可通过分析对短焦成像质量影

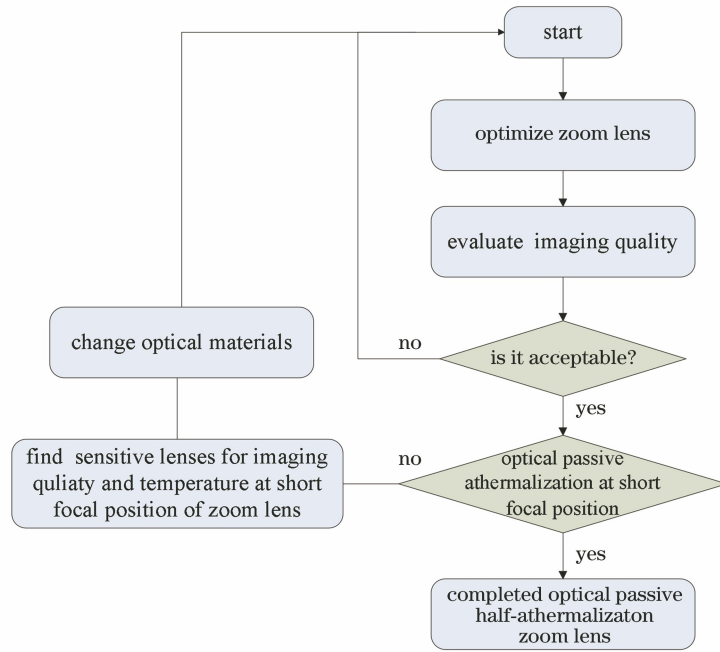


图 1 变焦光学系统的半无热化设计方法

Fig. 1 Optical passive half-athermalization design method for zoom optical system

响较大的变焦组元和透镜来找到所谓的敏感透镜。

对于前组为调焦组的变焦光学系统,短焦系统采用光学被动半无热化设计,该光学被动半无热化变焦光学系统有两大优势。1)解决了传统变焦系统在变焦全程频繁温度调焦的问题;2)极大减小了调焦量,既有利于快速对焦,又有利于调焦曲线的线性化,从而提高调焦精度,克服传统变焦系统在调焦零位附近行程变化非常缓慢,又避免调焦行程两端,即调焦曲线斜率的快速增大,解决了调焦精度急剧下降的问题。

3 光学被动半无热化变焦系统设计实例

3.1 设计指标

变焦光学系统的设计指标如表 1 所示。从表 1 可以看到,光学系统要求的焦距范围为 30~1000 mm,工作波段为 486~656 nm,光圈不大于 F_8 。

表 1 变焦光学系统的设计指标

Table 1 Design specification of zoom optical system	
Index	Value
Wavelength /nm	486-656
Resolution of image sensor / (pixel× pixel)	2000×1500
Pixel size of image sensor / ($\mu\text{m}\times\mu\text{m}$)	5.5×5.5
Effective focal length (EFL) /mm	30-1000
F -number	$\leq F_8$
Lateral color / μm	≤ 6
Relative distortion at short focal length position /%	≥ -0.9 , $\leq +0.9$
Relative distortion at long focal length position /%	≥ -0.8 , $\leq +0.8$

3.2 光学系统设计

变焦系统依次由前组(调焦组)、变倍组、补偿组和后固定组组成,在系统设计温度为 +20 °C 下的结构如图 2 所示。

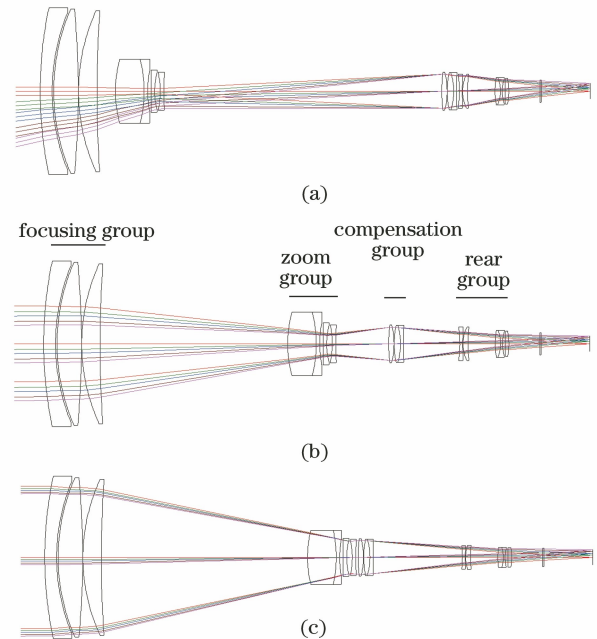


图 2 光学系统的二维结构图。(a)短焦(焦距为 30 mm); (b)中焦(焦距为 450 mm);(c)长焦(焦距为 1000 mm)

Fig. 2 Two-dimensional diagram of optical system. (a) Short focal length (focal length is 30 mm); (b) middle focal length (focal length is 450 mm); (c) long focal length (focal length is 1000 mm)

变焦系统中变倍组的运动会引起焦距发生变化,而补偿组作相应的补偿运动来保证像面位置不变。在变焦过程中只有变倍组和补偿组运动,其他组元位置不变。系统中前组为调焦组,主要通过调焦来补偿系统的温度离焦。

变焦系统为正组补偿结构,光圈浮动^[4],变倍过程中对系统进行换根的设计,设计后系统成像优良,结构紧凑^[5-7]。孔径光阑位于补偿组中第一个透镜的前表面,换根点位于焦距 450 mm。

光学系统采用光学被动半无热化设计,系统设计的温度范围为 $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$,短焦像质对温度变化不敏感,短焦系统采用光学被动无热化设计。使用过程中,在工作温度范围内的任何温度下,只需在长焦位置调焦一次,即可保证从长焦到短焦的变焦全程一致清晰成像,中间过程无需再调焦。

光学零件全部为球面,对其进行了公差优化设

表 3 光学系统在不同有效焦距下的光学参数

Table 3 Optical parameters of optical system at different effective focal lengths

Parameter	Effective focal length (EFL) /mm						
	30	300	450	600	750	850	1000
F-number	4.4	6.4	6.9	7.3	7.4	7.7	8.0
Field of view (FOV) /($^{\circ}$)	25.950	2.610	1.737	1.302	1.040	0.920	0.782
Distortion /%	-0.730	0.750	0.770	0.780	0.790	0.794	0.800

变焦系统的孔径光阑位于补偿组中第一个透镜的前表面,其中补偿组对短焦像质以及短焦温度特性的影响非常明显,故更换补偿组中敏感透镜的光学材料。

初始设计中,当补偿组中的第一片双凸正透镜采用 HFK61 时,光学系统的成像质量,尤其是短焦下的 MTF 更大,但 HFK61 的线膨胀系数达到 13.1×10^{-6} ,温度系数为 -6.0×10^{-6} ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和 -6.6×10^{-6} ($+60\text{ }^{\circ}\text{C}$),数值远高于普通无色玻璃,从而导致两方面问题。一方面短焦温度特性太差,温度变化会对成像质量产生明显的影响;另一方面调焦对短焦像质的变化不敏感,使得短焦系统的调焦量非常大,不利于快速调焦以及调焦曲线的设计。

设计过程中,通过将补偿组中正透镜的光学材料由初始温度折射率及线膨胀系数较大的光学材料 HFK61 更换为 HZK10,解决了短焦温度特性较差的问题。更换光学材料后,变焦光学系统需要重新优化,以满足所需成像质量的要求。当然也可选择其他光学线膨胀系数小的光学材料,这主要取决于对变焦光学系统成像质量的影响程度。

光学系统中补偿组的透镜材料依次为 HZK10、HZK10 和 HZLAF76A;后固定组的透镜材料依次

计,设计过程中充分考虑公差、材料、加工和定心等要求,加工制造性能良好。光学系统的后截距较长,也可增加棱镜或反射镜来缩短光路长度。光学系统的主要光学参数如表 2 所示,在不同有效焦距下的光学参数如表 3 所示。从表 2 可以看到,光学系统的光圈为 $F_{4.4}\sim F_{8}$ 。

表 2 光学系统的主要光学参数

Table 2 Main optical parameters of optical system

Parameter	Value
Wavelength /nm	486-656
Resolution of image sensor / (pixel \times pixel)	2000 \times 1500
Pixel size of image sensor / ($\mu\text{m}\times\mu\text{m}$)	5.5 \times 5.5
F-number	$F_{4.4}\sim F_{8}$
Diameter /mm	138
Length /mm	460
Image distance (BFL) /mm	68.3

表 3 光学系统在不同有效焦距下的光学参数

Table 3 Optical parameters of optical system at different effective focal lengths

Parameter	Effective focal length (EFL) /mm						
	30	300	450	600	750	850	1000
F-number	4.4	6.4	6.9	7.3	7.4	7.7	8.0
Field of view (FOV) /($^{\circ}$)	25.950	2.610	1.737	1.302	1.040	0.920	0.782
Distortion /%	-0.730	0.750	0.770	0.780	0.790	0.794	0.800

为 H-ZLAF68B、HK9L、HZF13、H-ZLAF4LA 和 HF4。

在所设计的系统中结构件材料为铝合金 LY12,研究表明变焦系统中结构件采用铝合金、钛合金 TC4 或者其他金属材料,这些材料对不同温度下的像面一致性没有影响,影响的只是变焦系统的调焦量以及调焦后光学系统的成像质量。光学系统在各焦距位置处的 MTF 如图 3 所示。

从图 3 可以看出,光学系统在整个焦距段下探测器所能分辨的最高空间频率处,始终保持较大的 MTF 值,说明光学系统的成像质量良好。不同焦距位置下系统的倍率色差如图 4 所示。

从图 4 可以看出,光学系统的倍率色差在不同焦距位置下得到较好的控制与校正^[8-11],最大值小于 $6\text{ }\mu\text{m}$ 。

3.3 调焦量分析

变焦光学系统中的前组为调焦组,结构件均为铝合金 LY12。表 4 和表 5 给出了光学系统在不同温度($-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$)、不同焦距下前组的调焦量,其中“+”表示调焦镜组靠近探测器方向,“-”表示相反方向。

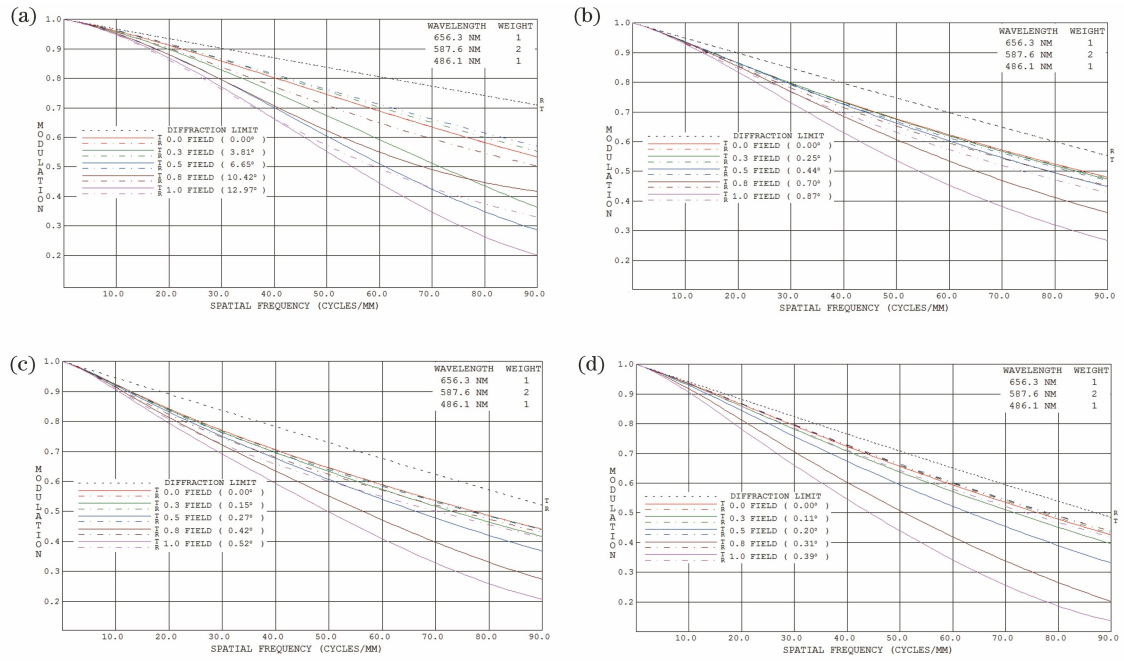


图 3 光学系统在各焦距位置处的 MTF 曲线。(a) EFL 为 30 mm;(b) EFL 为 450 mm;(c) EFL 为 750 mm;(d) EFL 为 1000 mm
 Fig. 3 MTF curves of optical system at different focal length positions. (a) EFL is 30 mm; (b) EFL is 450 mm; (c) EFL is 750 mm; (d) EFL is 1000 mm

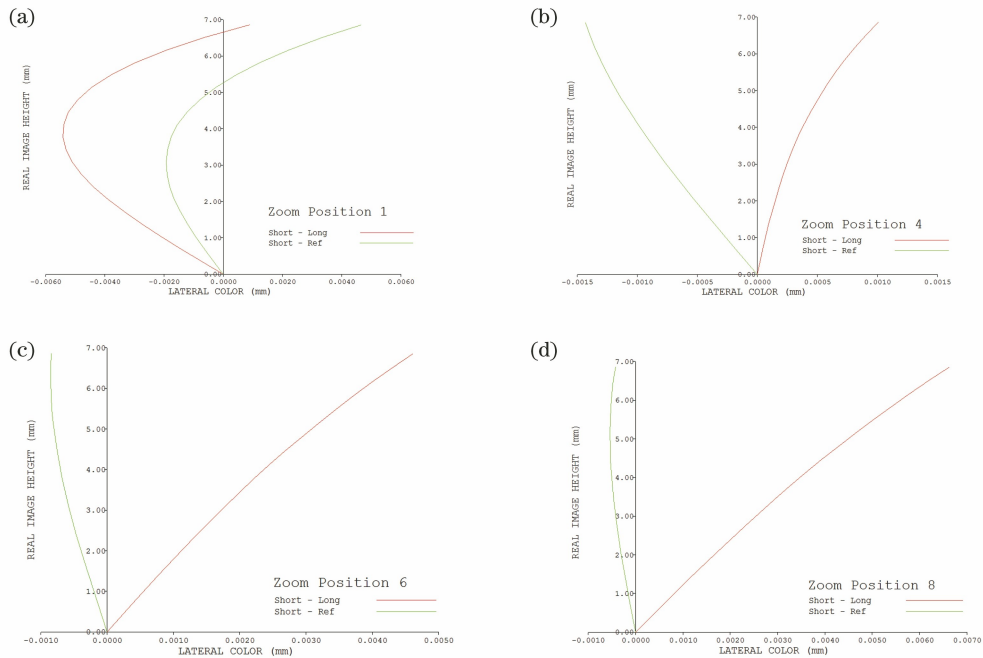


图 4 不同焦距位置下系统的倍率色差。(a) EFL 为 30 mm;(b) EFL 为 450 mm;(c) EFL 为 850 mm;(d) EFL 为 1000 mm
 Fig. 4 Lateral chromatic aberration of optical system at different focal position. (a) EFL is 30 mm; (b) EFL is 450 mm; (c) EFL is 850 mm; (d) EFL is 1000 mm

表 4 长焦位置的调焦量(物距为无穷远)

Table 4 Focusing amount at long focal length position (object distance is infinity)

Temperature /°C	-40	20	+60
Focusing amount /mm	+0.817	0	-0.560

表 5 短焦位置的调焦量(物距为无穷远)

Table 5 Focusing amount at short focal length position (object distance is infinity)

Temperature /°C	-40	20	+60
Focusing amount /mm	0	0	0

短焦系统采用光学被动无热化设计,在环境温度范围为 $-40 \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下无需调焦。 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下光学系统中短焦像面的离焦量(像面与探测器)为 $+0.0023\text{ mm}$; $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下光学系统中短焦

像面的离焦量为 -0.0060 mm ,远小于短焦系统的焦深 $\pm 0.02\text{ mm}$ 。光学系统中短焦系统在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下的 MTF 如图 5 所示。

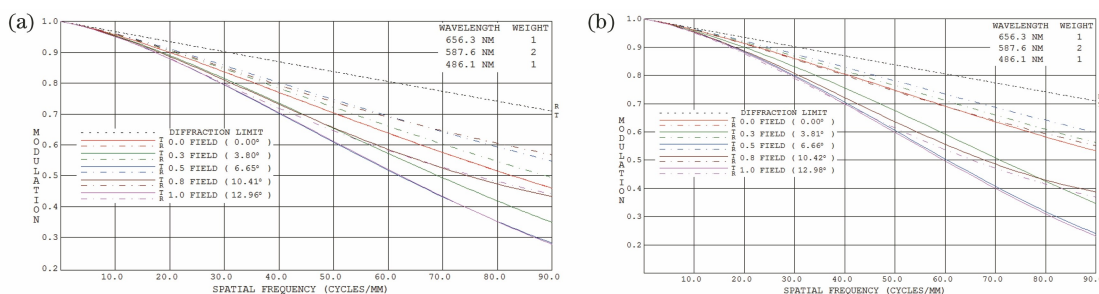


图 5 短焦系统(EFL 为 30 mm)在高低温下的 MTF 曲线。(a) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 5 MTF curves of short focal system (EFL is 30 mm) at high and low temperature. (a) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$

按照技术指标的要求,相机的工作温度范围为 $-40 \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据调焦量的分析,调焦组的调焦量范围为 $-0.56 \sim +0.82\text{ mm}$,调焦行程很短,非常有利于快速对焦。

3.4 变焦全程一致清晰成像分析

在工作范围内的任何温度下(限于篇幅,温度仅取 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$),光学系统的像面一致性(长焦

调好后,长焦向短焦调节)所对应的 MTF 曲线(为了精简,仅显示三个焦距位置)如图 6 和图 7 所示。

当工作温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,变焦系统中仅在长焦位置调焦(调焦量为 $+0.817\text{ mm}$,其中“+”表示调焦组靠近像面),保持调焦组不动,变焦全程中光学系统在不同焦距位置处的 MTF 曲线(其他焦距位置不调焦)如图 6 所示。

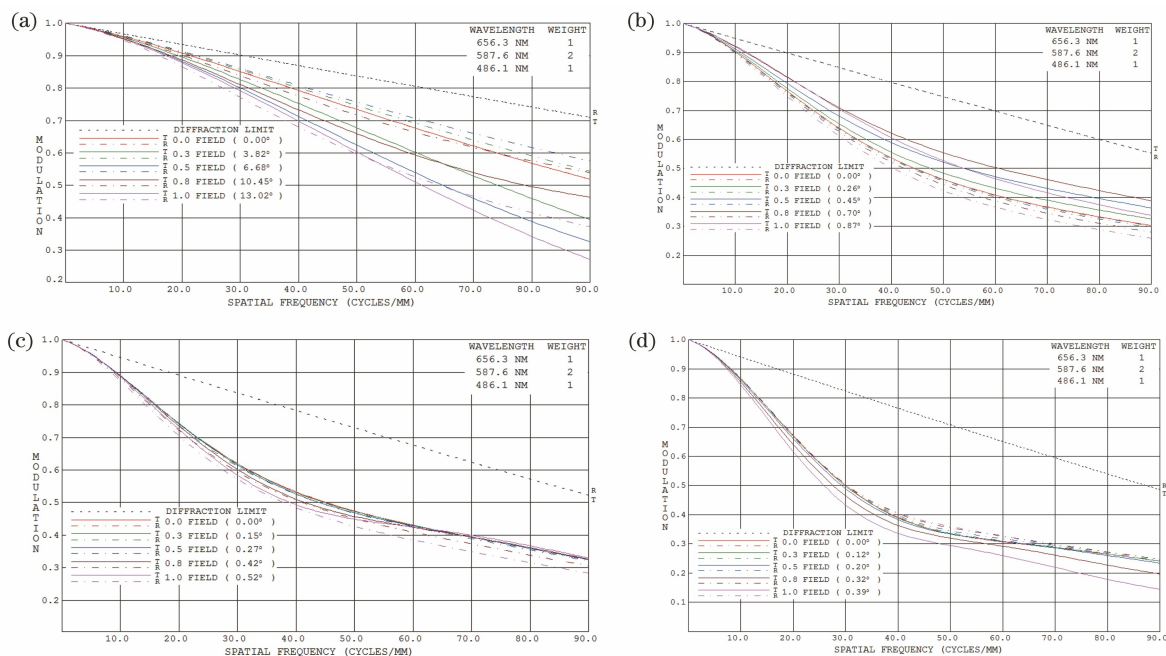


图 6 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变焦全程中光学系统在不同焦距处的 MTF 曲线(长焦调焦后)。(a) EFL 为 30 mm; (b) EFL 为 450 mm; (c) EFL 为 750 mm; (d) EFL 为 1000 mm

Fig. 6 MTF curves of optical system at different focal lengths in whole zoom process at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (after focusing only at long focal length). (a) EFL is 30 mm; (b) EFL is 450 mm; (c) EFL is 750 mm; (d) EFL is 1000 mm

当工作温度为 $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,变焦系统中仅在长焦位置调焦(调焦量为 -0.56 mm ,其中“-”表示调焦组远离像面),保持调焦组不动,变焦全程中光学系

统在不同焦距位置处的 MTF 曲线(其他焦距位置不调焦)如图 7 所示。

从图 6 和图 7 可以看出,光学系统在长焦调好

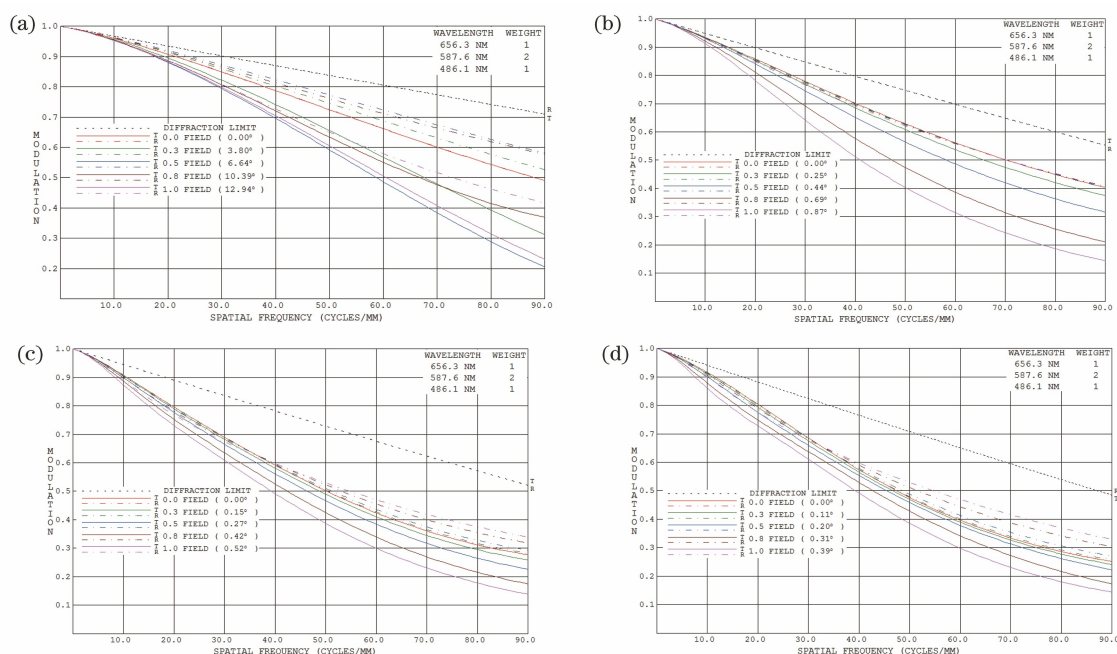


图 7 +60 °C 变焦全程中光学系统在不同焦距处的 MTF 曲线(长焦调焦后)。(a) EFL 为 30 mm; (b) EFL 为 450 mm; (c) EFL 为 750 mm; (d) EFL 为 1000 mm

Fig. 7 MTF curves of optical system at different focal lengths in whole zoom process at +60 °C (after focusing only at long focal length). (a) EFL is 30 mm; (b) EFL is 450 mm; (c) EFL is 750 mm; (d) EFL is 1000 mm

后,在从长焦到短焦的变焦全程均具有较大的 MTF 值,可以保证不同温度下的像面一致性,并且在工作温度范围内的任何温度下仅需在长焦位置处进行一次调焦,即可保证变焦全程的清晰成像。

4 结 论

本文提出了一种光学被动半无热化变焦系统设计方法,根据变焦系统的调焦组(前固定组)对长焦、短焦调焦敏感程度的差异,通过将调焦组的调焦敏感程度与系统短焦为光学被动无热化设计相结合的思路,设计了一种焦距范围为 30~1000 mm 的光学被动半无热化变焦系统,系统成像质量优良,结构紧凑。在工作温度范围为-40~+60 °C 的情况下,变焦系统只需在长焦位置调焦一次,即可保证在从长焦到短焦的变焦全程一致清晰成像,中间过程无需再调焦。该方法也极大地减小了变焦系统的温度调焦量,所设计的变焦系统的调焦总行程仅为 1.38 mm,由于调焦量很小,所以非常有利于快速对焦以及提高调焦精度。

参 考 文 献

[1] Zhang T C, Wang Y T, Chang J, et al. Design of reflective zoom systems with 3 mirrors [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 3034-3038.

张庭成,王涌天,常军,等.三反变焦系统设计[J].光学学报,2010,30(10):3034-3038.

[2] Cai W, Zhang Y, Zhang X, et al. New method for all movable zoom lens design[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322008.

蔡伟,张鹰,张新,等.多组全动型变焦系统新型设计[J].光学学报,2012,32(3):0322008.

[3] Xu W C, Huang W. Innovated lens design for catadioptric zoom system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0622005.

许伟才,黄玮.新型折反射式连续变焦系统设计[J].光学学报,2011,31(6):0622005.

[4] Jiang L, Huang W. Lens design for optical system of high zoom ratio [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1222006.

江伦,黄玮.高变倍比变焦距系统设计[J].光学学报,2011,31(12):1222006.

[5] Tao C K. Zoom lens design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 120-163

陶纯堪.变焦距光学系统设计[M].北京:国防工业出版社,1998:120-163.

[6] Wang W S, Mu D, Chen Y. Contemporary optical system design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.

王文生,牟达,陈宇.现代光学系统设计[M].北京:国防工业出版社,2016.

[7] Chen H D, Xue C X. Design of mid-wave infrared

- optical system with high variable ratio miniaturization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0222001.
- 陈虹达, 薛常喜. 高变倍比小型化的中波红外光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0222001.
- [8] Ma Y J, Zhang B, Hong Y F. Aberration automatic design of continuous zoom optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0822003.
- 马迎军, 张葆, 洪永丰. 连续变焦光学系统的像差自动设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0822003.
- [9] Lu Q, Ji Y Q, Shen W M. Design of a fore continual zoom system with high speed[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2674-2679.
- 陆强, 季轶群, 沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2674-2679.
- [10] Fan C X, Yang B, Liu Y P, et al. Zoom lens with high zoom ratio design based on Gaussian bracket and particle swarm optimization [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(11): 3217-3233.
- [11] Fan Z C, Wei S L, Zhu Z B, et al. Globally optimal first-order design of zoom systems with fixed foci as well as high zoom ratio[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38180-38190.