

激光与光电子学进展

多组元全动型大孔径及超大视场变焦系统设计

沈志娟^{1,2}, 林海峰^{1*}, 曹一青²

¹厦门理工学院光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024;

²莆田学院机电工程学院, 福建 莆田 351100

摘要 为了使变焦光学系统能够实现超大视场以及大孔径高分辨率成像,提出一种能够有效指导此类系统的设计方法。通过分析变焦光学系统的原理以及比较其变焦补偿方式,确定采用全动型补偿方式来实现整个系统的变焦。根据初级像差的理论并结合 ZEMAX 软件得到系统较合适的初始结构参数,对其进行优化设计可以得到一款由 14 片折射透镜组成的大孔径以及超大视场变焦系统,该系统的工作波段为 400~700 nm,焦距范围为 6.54~17.00 mm,变倍比为 2.6,全视场角范围为 60°~178°, F 数为 2.8,调制传递函数值在奈奎斯特频率 55.6 lp/mm 处均大于 0.40,说明系统的成像质量较好且满足设计要求。

关键词 几何光学; 变焦系统; 大孔径; 超大视场; 光学设计

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0708001

Design of Zoom Lens System with Movable Components Including Large Aperture and with Ultra-Wide Field of View

Shen Zhijuan^{1,2}, Lin Haifeng^{1*}, Cao Yiqing²

¹*School of Opto-Electronic and Communication Engineering, Xiamen*

University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China;

²*School of Mechanical and Electrical Engineering, Putian University, Putian, Fujian 351100, China*

Abstract A design method is proposed for achieving ultra-wide field of view and high-resolution imaging in an optical system including a zoom lens with a large aperture. By analyzing the principle of the optical system and comparing the mode of zoom compensation, an all-motion mode of compensation is adopted to enable zoom motion in the entire system. The primary aberration theory and the ZEMAX software program are applied to determine the initial structure parameters. The optimized design includes 14 components for the refraction lens aperture and large field of view zoom system. The parameters include a system working band of 400–700 nm, focal length range of 6.54–17.00 mm, changing time ratio of 2.6, full field of view angle ranges of 60°–178°, and F -number of 2.8. The modulation transfer function value in the Nyquist frequency, at 55.6 lp/mm, is greater than 0.40; therefore, the imaging quality of the proposed system very good and meets the design requirements.

Key words geometric optics; zoom system; large aperture; ultra-wide field of view; optical design

OCIS codes 080.3620; 120.4570; 230.4040; 220.1250

收稿日期: 2020-07-24; 修回日期: 2020-08-19; 录用日期: 2020-08-31

基金项目: 福建省自然科学基金(2020J01916, 2018J01568)、福建省中青年教师教育科研项目(JAT190590, JAT190567)、莆田市科技计划(2020GP004)

*E-mail: hflin@xmut.edu.cn

1 引言

对于超大视场光学成像系统,鱼眼镜头光学系统具有常规光学系统无法达到的视场角范围,广泛应用于场景监测、球幕电影及机器视觉等领域^[1-4]。对于此类系统,根据系统的焦距能否调节分为定焦距和变焦距两种^[5]。定焦距系统因其具有设计相对简单及成像质量高等特点而被广泛应用,但只能在最佳像面处获得良好像质。在不同焦距的情况下,定焦距系统成最清晰像的位置不同。假如像面的位置固定不变,这将很难在不同焦距位置处成清晰像,因此只能通过增加定焦距成像系统的数量或者应用变焦距系统来达到目的。然而随着精密机械设计和加工技术的发展,以及各类传感器器件水平的提高,使变焦距系统发展迅速,因此利用此类系统解决上述问题是较好的选择之一。

近年来,国内外研究人员对于鱼眼镜头这类超大视场光学成像系统的像差分析,以及设计方法进行了详细研究,基于此设计出了许多具有较好成像性能的系统并将其应用于实际中,但是对于此类成像系统,当前基本上都聚焦于定焦距系统^[6-9]。由于变焦距成像系统能够清晰地观察到不同焦距处的像以及物体的局部情况,而且许多领域对该类系统的需求越来越多,为了设计出成像质量优良的系统,科研人员对系统初始结构的参数确定、组元补偿方式及优化方法等方面进行了较多研究,然而这些工作大部分集中在中小视场^[10-13]。对于超大视场,科研人员不仅要求其具有高成像性能,还往往追求大孔径成像来达到提高像面照度的目的,这会使该类系统具有大相对孔径、超大视场及变焦距这三个特点,为此设计难度大大提升,从而导致此类系统的设计方法是目前一个亟需解决的课题。

对于变焦光学系统,本文在设计原理和初级像差理论的基础上^[14-16],研究了大孔径和超大视场变焦系统在设计方面的相关问题,应用 ZEMAX 软件设计了一款焦距范围为 6.54~17.00 mm、全视场角范围为 60°~178°、变倍比为 2.6 和 F 数为 2.8 的高分辨率变焦系统,本文所述方法将为以后设计此类系统提供一种有效的参考方法。

2 变焦系统的设计理论

2.1 设计原理

变焦光学系统是当系统焦距在一定范围内发

生连续变化时,能够保持像面的位置稳定不变且在变焦过程中具有良好像质的系统。在变焦系统中,利用变倍组和补偿组的关联移动来实现焦距的连续变化,并借助补偿组的运动来补偿系统在变焦过程中产生的像面移动,从而获得高清晰成像。此类系统在变焦过程中主要遵循如下四个规律^[17]。

1) 系统焦距的变化由改变组元之间的间隔来实现。假设某个系统中含有双组元,其光焦度分别为 Φ_1 和 Φ_2 ,则该系统的光焦度为

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2, \quad (1)$$

式中: d 为两组元间隔。因 Φ_1 和 Φ_2 是固定不变的,所以只能通过改变 d 来实现系统焦距的变化。

2) 由光焦度分别为 Φ_1 和 Φ_2 的两组元组成的系统如图 1 所示,其中 A 和 A' 分别为物点和像点, L_1 和 L_2 分别为 Φ_1 和 Φ_2 的共轭距。当 Φ_1 向右移动距离为 q 时, L_1 的相应移动量为 ΔL_1 。为了在该情况下保证点 A' 不动, Φ_2 需要向左移动距离为 Γ 来补偿,其共轭距的变化量应为 $-\Delta L_1$,则

$$\sum_{i=1}^2 \Delta L_i = 0. \quad (2)$$

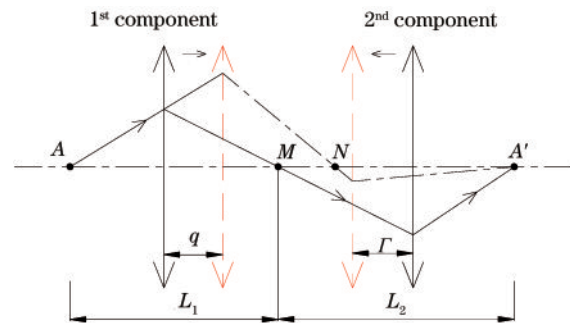


图 1 变焦移动补偿的原理图

Fig. 1 Schematic of zoom motion compensation

对于多组元变焦光学系统,通过保证不同组元共轭距的总改变量为零来实现系统像面的稳定。

3) 在变焦光学系统中,只有满足物像交换的原则才能确保像平面的完美补偿,才能保证获得高质量成像。

4) 对于变焦光学系统中任意一个可运动的组元,当焦距和横向放大倍率分别为 f' 和 $\beta = -1$ 时,其物像共轭距的最小值 $L_{\min} = 4f'$ 。

2.2 补偿方式

变焦光学系统中,可运动的组元间距变化后会

来抵消像面移动。按照补偿方式的不同,主要分为光学补偿、机械补偿、双组联动补偿及全动补偿等类型。对于变焦光学系统,目前科研人员不仅对其提出了拥有大相对孔径,同时还需要实现超大视场。另外全动补偿型变焦光学系统中的各组元都可以通过自由移动来获得焦距连续变化的效果,组元既可以线性移动也可非线性移动,实现了系统运动组元数目的最大化。相比于其他补偿类型,全动补偿类型具有系统结构简单、系统总长缩短,以及能够更有效校正系统的高级像差等特点。随着机械加工技术的发展,凸轮加工的精度越来越高,因此实验采用全动补偿方式来设计大孔径以及超大视场的变焦光学成像系统。

全动型变焦光学系统的变焦运动情况如图 2 所示。以三组元系统为例,对其变焦运动方程进行研究。由于此类系统中的三个组元各自独立移动,若达到像面补偿和像面稳定的目的^[16-17],需要满足

$$(1 - m_1^2)m_2^2m_3^2dq_1 + (1 - m_2^2)m_3^2dq_2 + (1 - m_3^2)dq_3 = 0, \quad (3)$$

式中: m_i 和 q_i 分别为第 $i(i=1,2,3)$ 个组元的倍率和移动量。

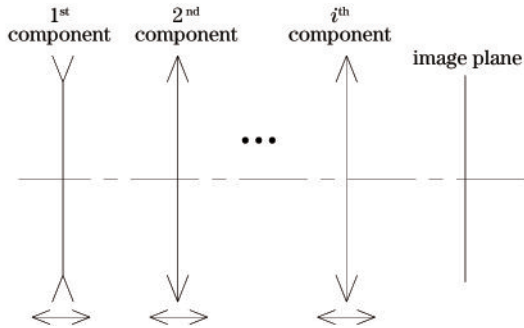


图 2 全动型变焦光学系统的变焦运动示意图

Fig. 2 Schematic of zoom motion of all-motion zoom optical system

应用各运动组元的微分移动量与倍率的变化关系,能够得到系统变焦运动方程,即

$$\frac{1 - m_1^2}{m_1^2} f_1' dm_1 + \frac{1 - m_2^2}{m_2^2} f_2' dm_2 + \frac{1 - m_3^2}{m_3^2} f_3' dm_3 = 0, \quad (4)$$

式中: f_i' 为第 $i(i=1,2,3)$ 个组元的焦距。联立(3)式和(4)式,可以得到由 k 个组元组成的全动型变焦光学系统的运动方程,即

$$\sum_{i=1}^k \frac{1 - m_i^2}{m_i^2} f_i' dm_i = 0. \quad (5)$$

3 超大视场变焦系统的设计方法

3.1 设计要求

当设计超大视场变焦光学系统时,选用 Sony 公司生产型号为 IMX432LLJ 的 CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 传感器,其有效总像素为 1608 pixel(H) \times 1104 pixel(V),单个像素尺寸(S_{single})为 9.0 μm (H) \times 9.0 μm (V),靶面对角线尺寸为 17.6 mm,其中 H 和 V 分别为垂直和水平解析度。为了使 CMOS 传感器的分辨率与设计系统可以更好匹配,应用奈奎斯特定理可以得到该变焦光学系统的奈奎斯特频率,表达式为

$$N = \frac{1000}{2 \times S_{\text{single}}} = \frac{1000}{2 \times 9} = 55.6. \quad (6)$$

超大视场变焦光学系统设计的主要技术参数如表 1 所示。从表 1 可以看到,该系统的工作波段为 400~700 nm,焦距范围为 6.54~17.00 mm,变倍比为 2.6,全视场角范围为 60°~178°, F 数为 2.8。

表 1 超大视场变焦光学系统的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of zoom optical system with ultra-wide field of view

| Parameter | Value |
|---|------------|
| Working wavelength /nm | 400~700 |
| Variable ratio | 2.6 |
| F -number | 2.8 |
| Effective focal length /mm | 6.54~17.00 |
| Filed angle /($^\circ$) | 60~178 |
| Total length /mm | ≤ 150 |
| Root-mean-square radius of spot diagram / μm | ≤ 9 |

3.2 系统初始结构及参数的确定

合适的初始结构参数在设计高分辨率成像系统的过程中起到至关重要的作用,因此根据表 1 的系统设计参数,在 JP2012194238A 专利中的第 1 个系统的基础上删除其最后的平行平板^[18],再对其结构参数进行相应的缩放和修改(如焦距、 F 数及视场角等),从而得到系统的初始结构。实验采用全动补偿方式,在设计之前对系统进行组元划分。在考虑提升组元数量和系统机械结构的设计及装调难度的基础上,确定对系统结构进行三组元划分,分别为变倍组(第 1 至第 5 块透镜)、第一补偿组(第 6 至第 11 块透镜)和第二补偿组(第 12

至第 14 块透镜),具体组元划分情况如图 3 所示。

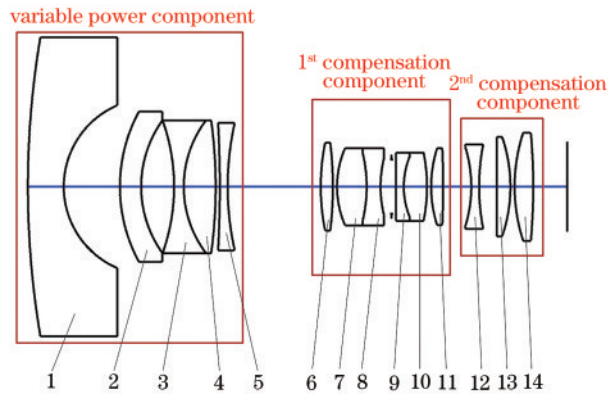


图 3 变焦光学成像系统中的组元划分示意图

Fig. 3 Schematic of component division in zoom optical imaging system

一般情况下,可以将鱼镜头光学系统分为前组和后组光学系统,分别采用具有负光焦度和正光焦度的透镜组,因此将系统变倍组元作为前组光学系统,第一和第二补偿组作为后组光学系统。在变焦光学系统焦距变化的范围内,选取具有代表性的焦距。由于前组光学系统具有平面对称光学系统的像差特性,所以不能应用赛德尔像差理论对其进行分析^[19],因此应用 ZEMAX 软件来计算前组光学系统中波面的球差、彗差、像散、场曲、畸变、位置色差和倍率色差的像差系数。对于后组光学系统,将其等效成薄透镜系统,应用近轴光学初级波像差系数计算其对应的波像差系数,表达式为

$$\begin{cases} W_I = \frac{1}{8} S_I \\ W_{II} = \frac{1}{2} S_{II} \\ W_{III} = \frac{1}{2} S_{III} \\ W_{IV} = \frac{1}{4} (S_{III} + S_{IV}) \\ W_V = \frac{1}{2} S_V \\ W_{IS} = \frac{1}{2} C_I \\ W_{IS} = C_{II} \end{cases} \quad (7)$$

式中: W_I 、 W_{II} 、 W_{III} 、 W_{IV} 、 W_V 、 W_{IS} 和 W_{IS} 分别为波面的球差、彗差、像散、场曲、畸变、位置色差和倍率色差的像差系数; S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 、 S_{IV} 、 S_V 、 C_I 和 C_{II} 分别为波面的球差、彗差、像散、场曲、畸变、位置色差和倍率色差的像差系数,具体计算表达式为

$$\begin{cases} S_I = \sum_{j=1}^g h_j P_j \\ S_{II} = \sum_{j=1}^g h_{zj} P_j + J \sum_{j=1}^g W_j \\ S_{III} = \sum_{j=1}^g \frac{h_{zj}^2}{h_j} P_j + 2J \sum_{j=1}^g \frac{h_{zj}}{h_j} W_j + J^2 \sum_{j=1}^g \Phi_{bj} \\ S_{IV} = J^2 \sum_{j=1}^g \mu \Phi_{bj} \\ S_V = \sum_{j=1}^g \frac{h_{zj}^3}{h_j^2} P_j + 3J \sum_{j=1}^g \frac{h_{zj}^2}{h_j^2} W_j + J^2 \sum_{j=1}^g \frac{h_{zj}}{h_j} (3 + \mu) \Phi_{bj} \\ S_{IS} = \sum_{j=1}^g h_j^2 \frac{\varphi_j}{v_j} \\ S_{IS} = \sum_{j=1}^g h_j h_{zj} \frac{\varphi_j}{v_j} \end{cases} \quad (8)$$

式中: g 为光学面总数; $P = \left[\frac{\Delta u}{\Delta(1/n)} \right]^2 \Delta(u/n)$;

$W = \left[\frac{\Delta u}{\Delta(1/n)} \right] \Delta(u/n)$; u 为孔径角; n 为透镜的折射率; Φ_{bj} 为后组光学系统的光焦度; φ_j 为第 j 个光学面的光焦度; μ 一般取 0.6~0.7; J 为拉-赫不变量; h_j 和 h_{zj} 分别为任一孔径光线和主光线在第 j 个光学面上的高度; v_j 为第 j 个光学面的阿贝数。为了初步校正系统像差,建立前组和后组系统的像差平衡方程,对方程式进行求解可以得到后组系统的结构参数^[16]。

综上所述,应用上述方法对选取的初始结构进行光学结构参数的修正,最终得到优化设计前需要的且较为理想的初始结构参数。

3.3 优化设计方法及结果分析

系统的初始结构确定后,经过后续反复的像差校正和平衡过程,可以得到成像性能好的系统。由于变焦光学系统的结构较复杂,单纯应用像差理论很难将像差校正和平衡到较理想的情况,因此在确定的初始结构的基础上,采用 ZEMAX 软件对其进行像差优化。

由于系统的变倍比为 2.6,所以焦距变化范围较大。为了在连续的焦距范围内更好地得到高分辨率成像,将系统分为 7 个组态,焦距分别为 6.54, 8.28, 10.02, 11.77, 13.51, 15.25, 17.00 mm。为了使系统在大视场角的情况下能够获得高像面照度成像,实验采用大孔径成像系统,在多重结构的设计中应用操作键 APER (Aperture)、THIC (Thickness) 和 YFIE (Y-Field) 分别控制各组态的 F 数、移动距离和视场角。将光学结构的相应参数作为优化变量,使

用像差控制操作键来控制相应的像差;将 TTHI (Total Thickness)操作键的权重设为零,使用DIFF (Difference)操作键控制各组态的 TTHI 之差为零,以及使用 OPGT (Operand Greater Than)和 OPLT (Operand Less Than)操作键来控制系统中各块透镜在优化过程中的厚度,不能太厚也不能太薄。采用锤形优化的方式对系统进行反复优化,同时根据每次优化的结果来调整相应像差操作键的权重系数,可以针对性地优化系统,最终实现将像差校正到较理想的情况^[20-21]。采用上述方法对系统进行反复优化设计后,最终优化后的变焦光学系统中第一片透镜前光学表面顶点到像平面中心的距离(可称为“机械筒长”)均不大于 104.44 mm,且各组态的主要结构参数如表 2 所示。从表 2 可以看到,这些参数均符合表 1 给出的结构参数,另外设计中使用的所有光学面均采用球面,便于加工及降低生产成本。

表 2 优化后的变焦光学系统中各组态的主要结构参数
Table 2 Main structural parameters of each state in optimized zoom optical system

| Configuration | Focal length /mm | Full field of view /($^{\circ}$) | F number |
|---------------|------------------|------------------------------------|----------|
| 1 | 6.54 | 178 | 2.8 |
| 2 | 8.28 | 140 | 2.8 |
| 3 | 10.02 | 110 | 2.8 |
| 4 | 11.77 | 96 | 2.8 |
| 5 | 13.51 | 80 | 2.8 |
| 6 | 15.25 | 70 | 2.8 |
| 7 | 17.00 | 60 | 2.8 |

优化后的变焦光学系统在焦距分别为 6.54, 11.77, 17.00 mm 处的结构和光路如图 4 所示,相应的光学结构参数如表 3 所示,其中 stop 表示孔径光阑, & 前后的值分别为系统在焦距 $f=6.54, 11.77, 17.00$ mm 处的对应量。

调制传递函数(MTF)是评价光学系统成像性能的一个重要手段,优化后的变焦光学系统的传递函数如图 5 所示。从图 5 可以看到,在整个焦距范围内,在奈奎斯特频率为 55.6 lp/mm 处的 MTF 值都大于 0.40;MTF 曲线平直,成像质量较好。此外,该系统在 $f=6.54, 11.77, 17.00$ mm 的情况下, $0, 0.5\omega, 0.7\omega$ 和 1.0ω 大小的视场对应的点列图的方均根(RMS)半径值如表 4 所示,其中 ω 为半视场角。从表 4 可以看到,系统在 $f=6.54, 11.77, 17.00$ mm 的情况下,全视场角范围内的 RMS 半径值均小于选用 CMOS 传感器单个像素尺寸(9.0 μm),说明系统满足设计的要求。

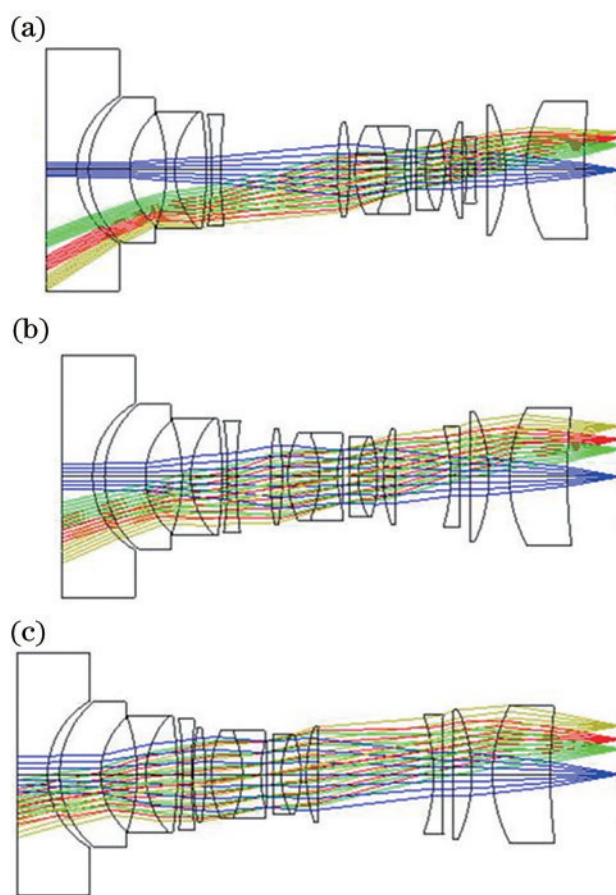


图 4 优化后的变焦光学系统在不同焦距处的结构和光路。
(a) $f=6.54$ mm; (b) $f=11.77$ mm; (c) $f=17.00$ mm

Fig. 4 Structure and optical path of optimized zoom optical system at different focal lengths. (a) $f=6.54$ mm; (b) $f=11.77$ mm; (c) $f=17.00$ mm

表 3 优化后的变焦光学系统的光学参数

Table 3 Optical parameters of optimized zoom optical system

| Surface | Radius / mm | Spacing / mm | Refractive index | Abbe number |
|--------------|-------------|---------------------|------------------|-------------|
| Object plane | Infinity | Infinity | | |
| 1 | 18645.33 | 5.30 | 1.8350 | 43.129 |
| 2 | 14.69 | 2.08 | | |
| 3 | 16.34 | 7.09 | 1.8350 | 43.129 |
| 4 | 12.97 | 6.33 | | |
| 5 | -28.42 | 1.50 | 1.4875 | 70.406 |
| 6 | 14.79 | 5.44 | 1.7569 | 31.703 |
| 7 | -67.96 | 0.98 | | |
| 8 | -66.04 | 1.48 | 1.6936 | 49.233 |
| 9 | 73.64 | 20.26 & 5.88 & 0.33 | | |
| 10 | 46.23 | 2.07 | 1.7440 | 44.850 |
| 11 | -52.16 | 0.98 | | |
| 12 | 17.38 | 5.47 | 1.6166 | 36.628 |

续表

| Surface | Radius / mm | Spacing / mm | Refractive index | Abbe number |
|-------------|-------------|------------------------|------------------|-------------|
| 13 | -17.43 | 3.15 | 1.7552 | 27.580 |
| 14 | 21.80 | 0.99 | | |
| Stop | Infinity | 1.08 | | |
| 16 | 643.96 | 1.48 | 1.7569 | 31.703 |
| 17 | 15.21 | 3.35 | 1.4875 | 70.406 |
| 18 | -22.51 | 0.99 | | |
| 19 | 25.44 | 2.02 | 1.7352 | 41.591 |
| 20 | 345.36 | 0.85 & 9.63 & 20.03 | | |
| 21 | -31.37 | 1.53 | 1.7484 | 27.714 |
| 22 | 374.74 | 1.95 | | |
| 23 | -735.58 | 3.15 | 1.6204 | 60.324 |
| 24 | -27.28 | 3.57 | | |
| 25 | 24.82 | 10.02 | 1.6700 | 51.759 |
| 26 | 95.72 | 6.28 & 9.14 & 12.07 | | |
| Image plane | Infinity | - | | |

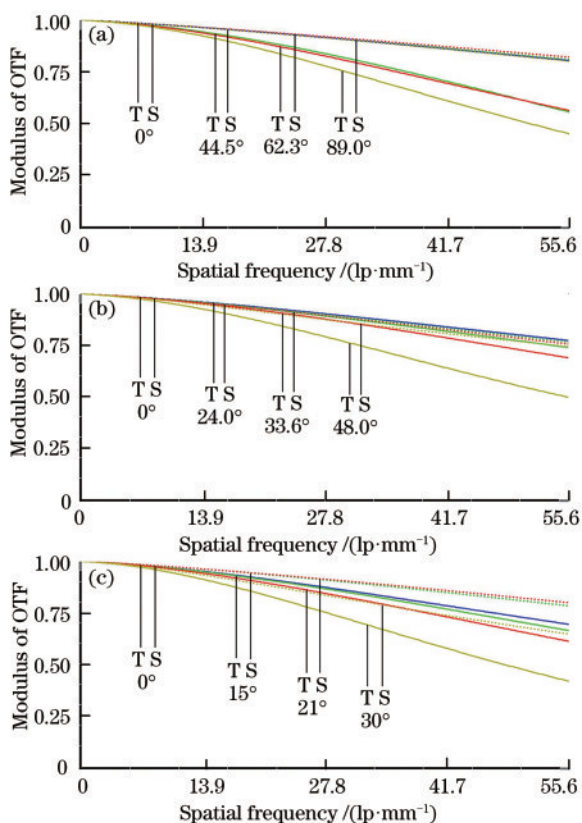


图 5 优化后的变焦光学系统在不同焦距处的 MTF 曲线。
(a) $f=6.54$ mm; (b) $f=11.77$ mm; (c) $f=17.00$ mm
Fig. 5 MTF curves of optimized zoom optical system at different focal lengths. (a) $f=6.54$ mm; (b) $f=11.77$ mm; (c) $f=17.00$ mm

表 4 不同焦距处视场角对应的点列图 RMS 半径
Table 4 RMS radii of dot plot corresponding to field angles at different focal lengths

| Field angle | RMS radius / μm | | |
|-------------|----------------------------|----------|----------|
| | 6.54 mm | 11.77 mm | 17.00 mm |
| 0 | 2.243 | 2.818 | 3.572 |
| 0.5ω | 3.366 | 3.109 | 3.486 |
| 0.7ω | 3.535 | 3.543 | 4.053 |
| 1.0ω | 4.284 | 5.188 | 6.189 |

在 $f=6.54, 11.77, 17.00$ mm 的情况下, 优化后的变焦光学系统的场曲和 F -theta 畸变曲线如图 6 所示。从图 6 可以看到, 系统在长焦距为 17.00 mm 处, 全视场

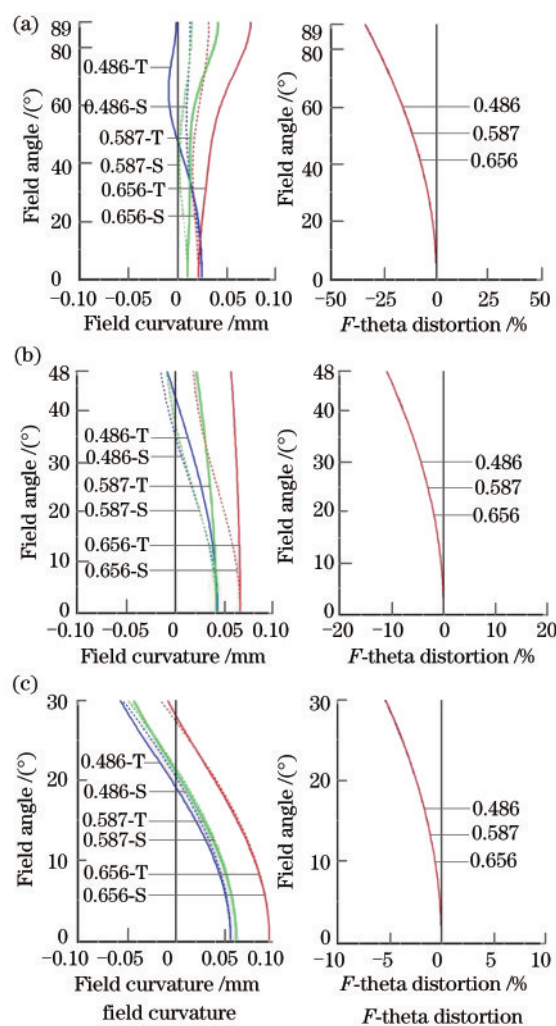


图 6 优化后的变焦光学系统在不同焦距处的场曲和 F -theta 畸变曲线。(a) $f=6.54$ mm; (b) $f=11.77$ mm; (c) $f=17.00$ mm
Fig. 6 Field curvature and F -theta distortion curves of optimized zoom optical system at different focal lengths. (a) $f=6.54$ mm; (b) $f=11.77$ mm; (c) $f=17.00$ mm

角范围内的场曲均不大于 0.15 mm; 在短焦距为 6.54 mm、中焦距为 11.77 mm 和长焦距为 17.00 mm 处, 边缘视场的最大畸变分别小于 35%、12% 和 6%; 对于大视场的情况下, 该畸变能够通过后期畸变校正算法来校正, 因此系统满足设计要求。图 7 为优化后的变焦光学系统的相对照度曲线。从图 7 可以看到, 全焦距和视场范围内的相对照度值非常大, 均大于 0.90。

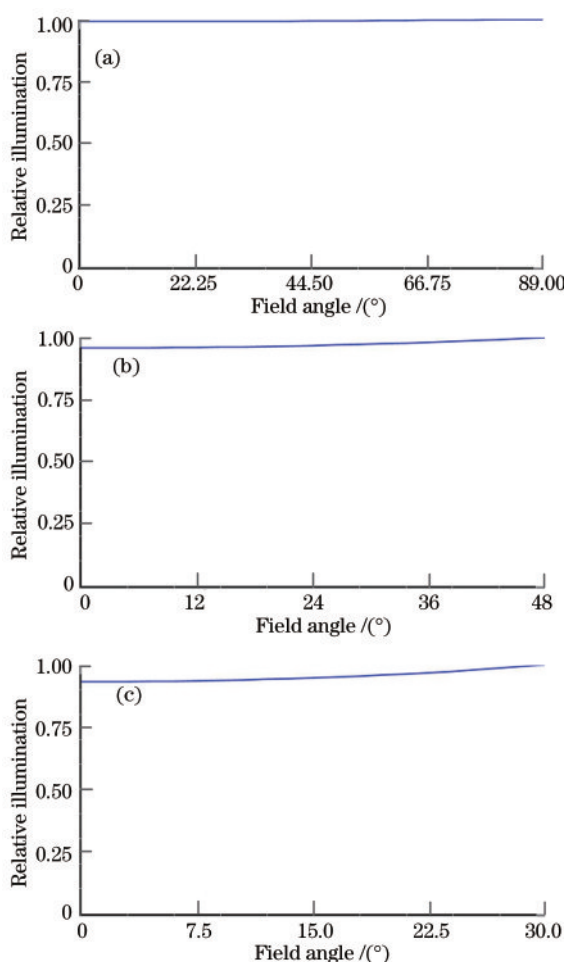


图 7 优化后的变焦光学系统不同焦距处的相对照度。

(a) $f=6.54$ mm; (b) $f=11.77$ mm; (c) $f=17.00$ mm

Fig. 7 Relative illumination of optimized zoom optical system at different focal lengths. (a) $f=6.54$ mm;

(b) $f=11.77$ mm; (c) $f=17.00$ mm

综上所述, 设计的变焦光学系统的 F 数为 2.8, 弥补了系统镜片组数偏多所造成的能量利用率下降, 可以使成像系统具有足够大的光照度, 同时达到了超大视场成像范围, 且系统的各项结构参数及像质指标均满足设计要求。

4 结 论

针对目前的实际需求, 设计可以实现大相对孔

径以及超大视场的变焦光学系统。在变焦原理和初级像差理论的基础上, 结合已有的专利数据库, 给出系统的合理初始结构确定方法。对全动型补偿变焦型结构使用 ZEMAX 软件进行优化, 实现焦距从 6.54 mm 到 17.00 mm 的连续变焦, F 数为 2.8, 全视场角范围为 $60^\circ \sim 178^\circ$, 总长不超过 104.44 mm。该系统的光学面均为球面, 而且像差得到了非常好的校正和平衡, 具有较好的成像质量, 像面照度始终稳定且均匀, 整体性能满足设计要求, 使得在实际应用中可以实现超大视场、高分辨率及不同焦距成像。本文方法为设计此类系统提供了一种参考方法, 具有一定的理论意义和实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] Hu X M, Zheng H, Chen Y Z, et al. Dense crowd counting based on perspective weight model using a fisheye camera[J]. *Optik*, 2015, 126(1): 123-130.
- [2] Kim H, Jung J, Paik J. Fisheye lens camera based surveillance system for wide field of view monitoring [J]. *Optik*, 2016, 127(14): 5636-5646.
- [3] Choi H, Park N C, Kim W C. Optical system design for light detection and ranging with ultra-wide field-of-view using liquid lenses [J]. *Microsystem Technologies*, 2020, 26(1): 121-131.
- [4] Yuan X, Song Y D, Wei X Y. Automatic surveillance system using fish-eye lens camera [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(2): 021101.
- [5] Mikš A, Novák J. Three-component zoom lens with fixed position of optical center [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(14): 3844-3847.
- [6] Li W S, Chen C, Song T, et al. Design of ultra wide-angle digital universal projection lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(8): 0822005. 李维善, 陈琛, 宋涛, 等. 超广角数字通用型投影镜头设计 [J]. *光子学报*, 2014, 43(8): 0822005.
- [7] Samy A M, Gao Z S. Simplified compact fisheye lens challenges and design [J]. *Journal of Optics*, 2015, 44(4): 409-416.
- [8] Kumler J J, Bauer M L. Fish-eye lens designs and their relative performance [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4093: 360-369.
- [9] Tian L, Lü L J, Cao Y Q. Calculation of modulation transfer function of fisheye lens with the wavefront aberration theory [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(3): 0322001. 田林, 吕丽军, 曹一青. 应用波像差理论计算鱼眼镜头调制传递函数 [J]. *光子学报*, 2016, 45(3):

- 0322001.
- [10] Mijs A, Novak J. Analysis of three-element zoom lens based on refractive variable-focus lenses [J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 23989-23996.
- [11] Wu X P, Hu J X. Design of continuous zoom optical system for periscope [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(2): 192-195.
吴学鹏, 胡际先. 潜望镜连续变焦光学系统设计 [J]. *应用光学*, 2018, 39(2): 192-195.
- [12] Luo C H, Yue P L, Zhang D H, et al. Optical design of zoom projection lens [J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(2): 180-186.
罗春华, 岳品良, 张东虎, 等. 变焦投影物镜光学系统设计 [J]. *应用光学*, 2017, 38(2): 180-186.
- [13] Zou Y C, Chau F S, Zhou G Y. Ultra-compact optical zoom endoscope using solid tunable lenses [J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20675-20687.
- [14] Wang Y Z. *Fisheye lens optics* [M]. Beijing: Science Press, 2006.
王永仲. 鱼镜头光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [15] Kidger M J. *Intermediate optical design* [M]. Bellingham: SPIE, 2004.
- [16] Wang Z J, Gu P S. *Practical optical technology manual* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
王之江, 顾培森. 实用光学技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [17] Sun H Y. *Optical system design of infrared zoom lens* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
孙宏宇. 红外变焦距光学系统设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [18] オリンパス株式会社. ズーム光学系またはそれを備えた撮像装置 (in Japanese): 2012194238A [P]. 2012-10-11 [2020-07-23]. <https://tech.sina.com.cn/digi/dc/2012-10-12/14007696855.shtml>.
- [19] Lu L J, Cao Y Q. Sixth-order wave aberration theory of ultrawide-angle optical systems [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(30): 8570-8583.
- [20] Cao G L, Liu F F, Jia Y D, et al. Design of ultraviolet warning optical system with large relative aperture and long focal length [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 122203.
曹桂丽, 刘芳芳, 贾永丹, 等. 大相对孔径、长焦距的紫外告警光学系统设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(12): 122203.
- [21] Li J Y, Li W Q, Long Y, et al. Design of off-axis three-mirror optical system based on free-form surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 092202.
李俊阳, 李文强, 龙尤, 等. 基于自由曲面的离轴三反光学系统设计方法研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 092202.