

大孔径宽光谱变焦镜头设计

罗锐 梁秀玲

Design of large-aperture and wide-spectrum zoom lens

LUO Rui, LIANG Xiuling

引用本文:

罗锐, 梁秀玲. 大孔径宽光谱变焦镜头设计[J]. 应用光学, 2022, 43(5): 839–845. DOI: 10.5768/JAO202243.0501002

LUO Rui, LIANG Xiuling. Design of large-aperture and wide-spectrum zoom lens[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(5): 839–845. DOI: 10.5768/JAO202243.0501002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0501002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[大孔径变焦投影镜头设计](#)

Design of large aperture zoom projection lens

应用光学. 2018, 39(3): 405–411 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0305001>

[大孔径大视场变焦投影镜头设计](#)

Design of zoom projection lens with large aperture and wild view

应用光学. 2018, 39(3): 412–417 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0305002>

[基于曲面传感器的大孔径1300万像素手机镜头设计](#)

Optical design of 13-megapixel mobile phone lens with large aperture based on curved sensor

应用光学. 2018, 39(6): 902–907 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0605005>

[大口径长焦距变焦光学系统设计](#)

Design of large aperture and long focal length zoom optical system

应用光学. 2018, 39(5): 644–649 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501009>

[大孔径长焦距摄远物镜光学系统设计](#)

Optical system design of large aperture and long focal length telephoto objective lens

应用光学. 2020, 41(2): 276–281 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201007>

[紫外宽光谱大相对孔径光学系统设计](#)

Design of UV optical system with wide ultraviolet spectrum and large relative aperture

应用光学. 2021, 42(5): 761–766 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082(2022)05-0839-07

大孔径宽光谱变焦镜头设计

罗 锐, 梁秀玲

(福建师范大学 光电与信息工程学院 医学光电科学与技术教育部重点实验室
福建省光子技术重点实验室, 福建福州 350007)

摘要: 在高压电线运输电力过程中容易发生电晕放电现象, 存在安全隐患, 因此, 进行电晕放电的检测十分必要。利用日盲紫外镜头进行电晕检测是检测手段之一。基于 Zemax 多重组态功能设计了一款大孔径宽光谱变焦镜头, 目的是配合变焦范围为 90 mm~165 mm 变焦距紫外镜头应用, 可在电晕放电信号检测时, 全天候、快速准确找出损坏线路的位置。该镜头采用 4 组元、近对称结构型式, F 数为 1.4, 可变焦范围在 30 mm~55 mm, 工作光谱波段为 400 nm~850 nm, 空间频率 100 lp/mm 处全视场 MTF ≥ 0.4 , 最大畸变 $\leq \pm 3\%$, 均采用标准球面设计, 系统总长为 110 mm, 适用于 0.847 cm (1/3 英寸) CCD, 能较好地矫正各类像差, 满足各零件基本加工工艺要求。

关键词: 光学设计; 变焦镜头; Zemax; 大孔径

中图分类号: TN202; O439

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202243.0501002](https://doi.org/10.5768/JAO202243.0501002)

Design of large-aperture and wide-spectrum zoom lens

LUO Rui, LIANG Xiuling

(Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine (Ministry of Education), College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In the process of high-voltage power line transportation, the corona discharge is easy to occur, which has potential safety hazards. Therefore, it is necessary to detect the corona discharge. Corona detection using solar blind ultraviolet (UV) lens is one of the detection methods. Based on the multiple configuration function of Zemax, a large-aperture and wide-spectrum zoom lens was designed to cooperate with the application of UV lens with the zoom range of 90 mm~165 mm, which could quickly and accurately find out the position of the damaged line in all-weather conditions when detecting the corona discharge signal. The four components and near-symmetrical structure were adopted by the proposed large-aperture and wide-spectrum zoom lens with the F number of 1.4, the zoom range of 30 mm~55 mm, the working spectral band of 400 nm~850 nm, the full field MTF ≥ 0.4 at spatial frequency of 100 lp/mm, and the maximum distortion $\leq \pm 3\%$, all adopting standard spherical design, total length of the system is 110 mm, which is suitable for 0.847 cm (1/3 inch) CCD, and can better correct all kinds of aberrations as well as meet the basic processing requirements of each part.

Key words: optical design; zoom lens; Zemax; large aperture

引言

随着社会的发展, 科技的进步, 人们对电的需

求日益增大。不管是日常生活, 还是在一些重要场所, 随处都能看到各种电路设施, 电力已经成为

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-04-06

基金项目: 福建省科技厅引导性项目 (2017H0010); 福建省科技重大专项 (2021YZ040012)

作者简介: 罗锐 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。Email: 523757385@qq.com

通信作者: 梁秀玲 (1964—), 女, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事光学设计与光学检测方面的研究。

Email: xliang@fjnu.edu.cn

世界不可或缺的能源之一。在电力输送过程中,通常使用高压线运输电力才能确保输送到用户的电压不会太低。然而在高压电线运输电力过程中,容易发生电晕放电现象,存在安全隐患^[1],一旦发现不够及时,对民众的生活及安全将造成重大威胁。因此,及时发现并处理电晕放电情况就十分必要。

用日盲紫外镜头进行电晕放电检测是目前较为可靠的检测手段之一^[2]。目前市面上的紫外镜头多为固定焦距,观察的范围较小,在进行电晕检测过程中会造成视野盲区。本文设计了一款大孔径宽光谱变焦镜头,成像质量良好,可配合变焦范围为 90 mm~165 mm 的变焦紫外镜头使用。利用变焦距日盲紫外镜头探测高压电力设备或输变电线产生的电火花,与可见光变焦距镜头匹配可捕捉电火花周边的可见光影像,夜幕下启用 850 nm 近红外照明设备,实时将二者影像组合成像,达到精确确定电晕位置和强度并及时发出报警,为后续高压电力设备维修提供可靠的依据。

1 光学系统设计

1.1 设计指标

本文设计的变焦镜头指标如表 1 所示。采用 0.847 cm (1/3 英寸)CCD 图像传感器,感光面尺寸为 4.8 mm×3.6 mm,像元大小为 5 μm×5 μm;由奈奎斯特频率(截止频率)计算公式 $f = (1/2)N$ 可得奈奎斯特频率^[3]为 100 lp/mm,要求在 100 lp/mm 处调制传递函数 MTF ≥ 0.4;工作波段为 400 nm~850 nm,夜间借助 850 nm 近红外 LED 照明也能清楚拍摄, F 数为 1.4,大孔径可确保阴天或夜晚不会因进光量不足而引起所成像昏暗不清^[4];为了使拍摄出的图像不会有明显的变形,畸变应控制在 3% 以内。

表 1 光学系统指标要求

Table 1 Parameter requirements of optical system

参数	值
光谱/nm	400~850
变焦范围/mm	30~55
F 数	1.4
像素尺寸/μm	5×5
靶面尺寸/mm	4.8×3.6
MTF(@100 lp/mm)	≥0.4
畸变/ %	≤±3

1.2 初始结构选取和优化设计

初始结构的选取通常有两种方法:一是基于薄透镜的初级像差理论的 PW 计算法,该算法计算量较大且繁琐;二是缩放法^[5]。本文选取第 2 种方法。

根据变焦比、焦距范围、孔径视场等设计指标,从现有镜头中筛选出参数较为符合本文的镜头^[6],其结构如图 1 所示。

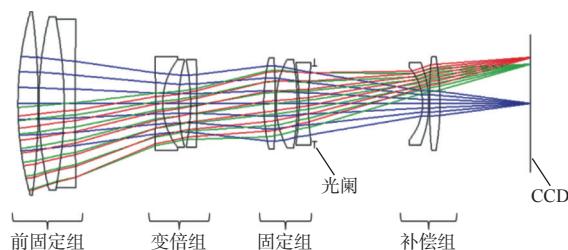


图 1 初始结构 2D 图

Fig. 1 2D diagram of initial structure

图 1 中从左到右依次为:前固定组、变倍组、固定组、光阑、补偿组、CCD。该初始结构变焦范围为 60 mm~166 mm, F 数为 3.9, 总长为 154 mm~164 mm, 全视场角为 12°, 工作波段为可见光, 中焦中心视场弥散斑半径为 46 μm, 边缘视场弥散斑半径为 57 μm。

本文设计要求变焦范围为 30 mm~55 mm, 使用 Zemax 软件将其焦距每隔 5 mm 划分一组, 可分为 30 mm、35 mm、40 mm、45 mm、50 mm、55 mm 共 6 组组态。为了矫正轴外像差,设计过程中应尽可能采用对称结构。因此,将光阑放在中间位置,即在变倍组与固定组之间,使整个系统处于一种近似对称结构。初始结构在变焦过程中光阑和像面位置都是变化的,再加上变倍组和补偿组的移动,变焦过程中有 4 个组元需要移动、相互匹配,这会导致机械设计和整体结构复杂化和成本较高。因此,在优化过程中必须控制前固定组、固定组、光阑、像面位置这 4 个组元的位置在变焦过程中保持不变,且光学总长不变,以保证成像位置稳定。在光学设计软件 Zemax 中加入复合操作数 TTHI、OPLT 和 DIFF,以控制 6 组组态在变焦过程中光学总长不变,光阑到像面位置不变。

从加工工艺上考虑,负透镜中心和正透镜边缘不能太薄,同时要求透镜也不能太厚,太厚会使镜头模组变得笨重,不利于仪器的小型化;太薄则会使镜片在加工或装配过程中发生破裂或崩边^[7]。同时,为了防止装配以及变焦过程中各组镜片之间由于加工误差造成镜片中心对顶现象,应使各

镜片之间保留足够空间, 空气间隙大于 0.3 mm, 移动的透镜组前后空气间隔应大于 1 mm, 系统后截距应保留至少 6 mm 的空间。这些要求均可以用操作数 CTGT、CTLT、ETGT、ETLT 来控制。

优化过程中, 暂时不考虑成像质量, 而是将光谱范围、焦距、孔径、视场以及透镜间空气间隔这类指标作为硬性要求进行初步优化。查看原初始结构光程差光扇图, 根据光扇图显示的像差情况采用 RMS+光斑半径+质心的优化方式。初步优化后得到一个较为稳定的结构, 然后再对成像质量进行进一步分析与优化^[8]。

通过点列图、光线光扇图和光程差光扇图分析影响像质的主要像差, 查看系统赛得尔系数, 挑选对像差贡献较大的表面, 改变其半径, 加入对应的像差操作数进行优化。优化过程中发现畸变未达能要求, 需加入操作数 DIMX 进行约束, 将畸变控制在 3% 以内。强行加入像差操作数后势必会对其他像差产生影响, 此时需将各类像差在设计指标要求之内进行平衡, 这是一个复杂且繁琐的过程, 需要进行多次优化与平衡。若像质未到达要求, 加入操作数 MTFA 控制中心视场, MTFT、MTFS 控制边缘视场可进一步优化。

对玻璃的选择还需考虑其成本与稳定性。阿贝数和折射率过高或过低的玻璃成本较高, 且性能不稳定^[9], 因此需要通过 MNIN、MXIN 操作数将所选用玻璃的折射率控制在 1.45~1.88, 用 MNAB、MXAB 操作数将阿贝数控制在 25~75。对于成像波段较宽的光学系统, 使用全球面玻璃易存在色差。通常情况下, 正透镜产生负色差, 负透镜产生正色差, 可以利用正负透镜组合并加入对应的像差操作数进行优化, 其色差相互补偿, 首选双胶合透镜对色差进行矫正。对于具有一定光焦度的双胶合透镜组, 宜用 2 块不同的正负透镜组合消色差, 且两种玻璃的阿贝数之差尽可能大。若双胶合透镜组光焦度为正, 正透镜采用低折射率、低色散的冕牌玻璃, 负透镜使用高折射率、高色散的火石玻璃; 反之, 透镜组光焦度为负时, 正透镜采用火石玻璃, 负透镜使用冕牌玻璃。基于以上理论, 对玻璃材料进行替换, 并适当改变曲率半径。同时, 为了控制整个镜头的生产成本, 均将玻璃替换为国产成都光明玻璃材料。通过逐渐改变系统结构参数, 进行多次优化后, 得到一个与设计指标较为接近的结果, 但还不够理想。

进一步对像差进行矫正。由初级球差公式

$$\delta T'_0 = -\frac{1}{2n'u'} \sum S_i (\sum S_i \text{ 为第一赛得和数})$$

和初级像差理论可知, 各类像差中, 孔径对初级球差的影响最大, 且初级球差与孔径的 3 次方成正比^[10]。本设计中 F 数为 1.4, 属于大孔径光学系统, 理论上球差对像质影响较大。查看系统的赛得尔系数, 发现球差在第 15 和 18 面贡献比较大, 故应先矫正该面的球差, 然后与其他像差进行平衡。通常矫正球差的方法有弯曲曲面、双胶合、分离光焦度^[11]。本文采用分离光焦度的方法, 即分裂透镜, 使承担较大光焦度的透镜分为 2 个, 减轻每个透镜所承担的光焦度。对分裂出的透镜材料进行替换, 对部分镜片进行微调, 多次优化后, 达到设计指标要求。

1.3 设计结果

优化后不同焦距的光学系统结构如图 2 所示。光阑位置调至中间, 在原有的初始结构基础上增加了 2 片镜片, 分离两组透镜的光焦度, 从而减小球差, 提高成像质量。系统可变焦范围在 30 mm~55 mm, 工作波段在 400 nm~850 nm, 全视场角为 6.3°~11.8°。与原专利相比, 像方 F 数从 3.8 减小到 1.4, 孔径增大了, 光学总长由原来的 154 mm~164 mm 浮动变化优化到固定的 110 mm, 各组总长相差小于 0.01 μm, 变焦过程中像面不会出现模糊。

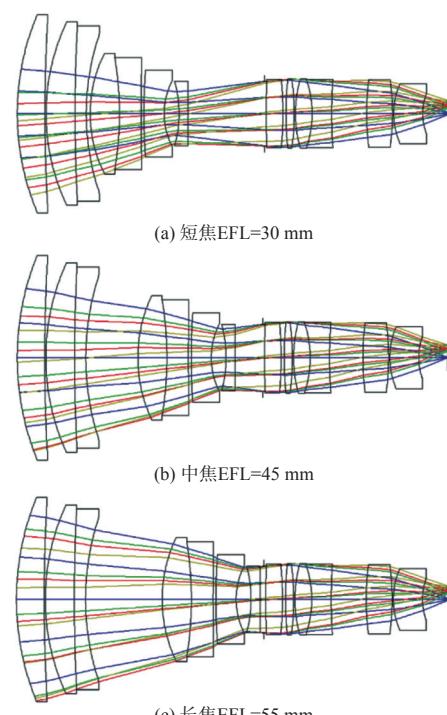


图 2 最终设计结果 2D 结构图
Fig. 2 2D structure diagram of final design results

2 像质评价

光学调制传递函数 MTF(modulation transfer function)是评价镜头质量的一个重要依据, 是镜头各项性能的综合体现^[12], 各组 MTF 曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出, 各组 MTF 在空间频率 100 lp/mm 处均大于 0.4, 符合设计要求。

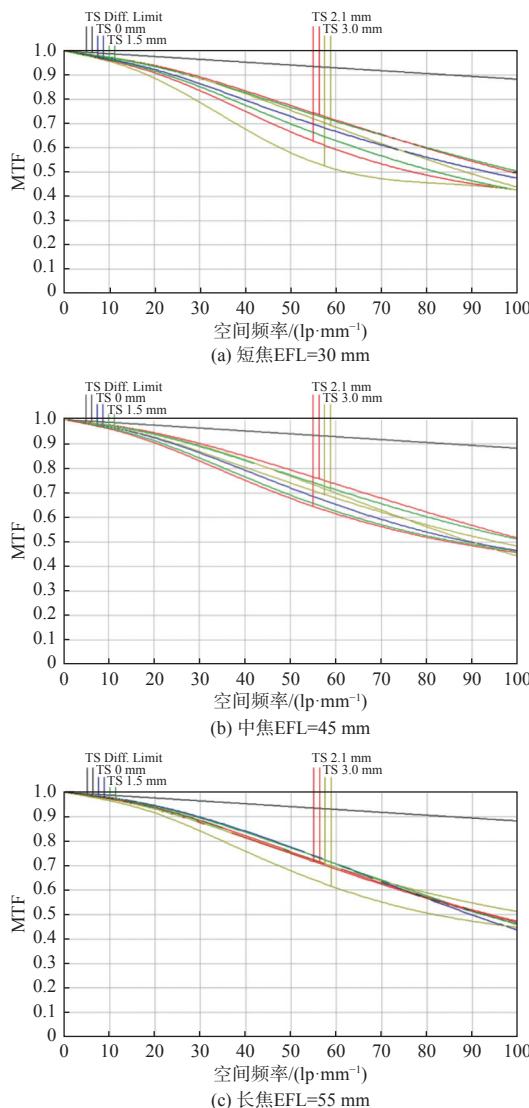


图 3 MTF 曲线图

Fig. 3 MTF curves

由于该镜头孔径较大, 因此需要分析球差情况, 镜头工作波段为可见光和 850 nm, 光谱较宽, 应分析色差对成像质量的影响。为使镜头所成图像没有太大的变形, 还需要分析畸变情况。

均方根半径(RMS)反映了像面成像的能量集中度^[13], 本文设计的镜头各焦距段在不同视场的 RMS 大小如表 2 所示。由表 2 可知, 除焦距 50 mm

和 55 mm 在边缘视场均方根半径分别为 4.328 μm 和 4.311 μm 外, 其余各焦距在全视场内均方根半径均小于 4 μm, 小于 CCD 的像元尺寸 5 μm, 可清晰成像^[14]。

表 2 各焦距点列图 RMS 半径
Table 2 RMS radius of spot diagram of each focal length

视场/ ω	焦距/mm						μm
	30	35	40	45	50	55	
0	3.121	3.008	3.024	3.066	2.853	2.726	
0.5	3.461	2.968	2.982	3.120	2.994	2.834	
0.7	3.727	2.947	3.005	3.234	3.219	3.091	
1	3.971	3.195	3.380	3.793	4.328	4.311	

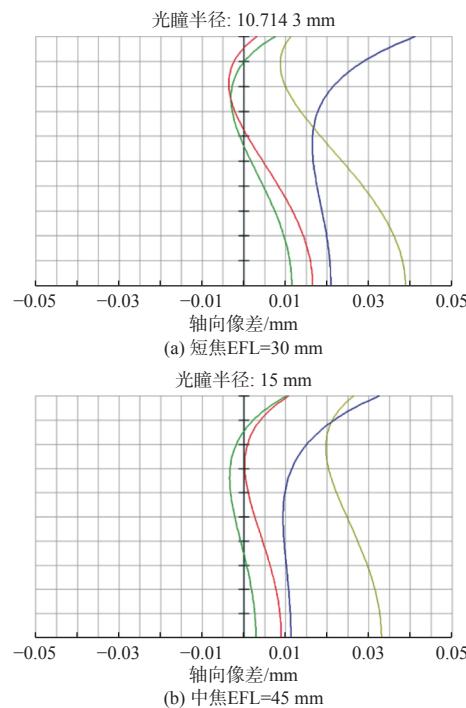
根据球差的定义, RMS 均方根半径反映的能量集中度也能反映出球差大小。为了更详细地了解球差的大小, 计算出不同焦距段的球差如表 3 所示, 轴向像差曲线如图 4 所示。综合来看, 各组球差控制较好, 对成像质量影响较小, 满足成像要求。

另外, 从图 4 可以看出各焦段的色差情况, 可知色差控制在一个较小的范围。

表 3 6 个焦距段的球差值

Table 3 Spherical aberration values of six focal segments

焦距/mm	30	35	40	45	50	55
球差/mm	0.0131	0.0087	0.0009	0.0042	0.0003	0.0198



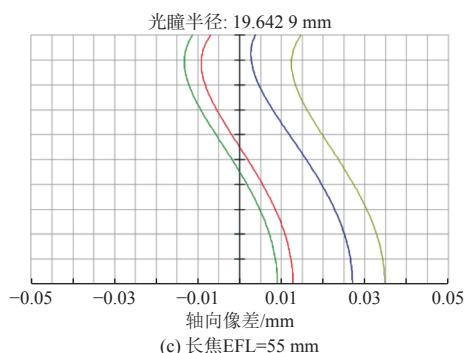


图 4 轴向像差曲线图

Fig. 4 Curves of longitudinal aberration

设计的镜头短焦、中焦和长焦的畸变曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出, 全视场的最大畸变均

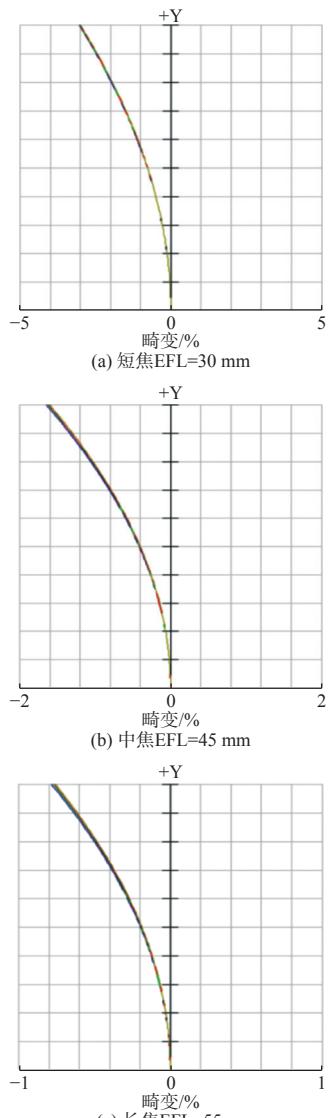


图 5 畸变曲线图

Fig. 5 Curves of distortion

在 $\pm 3\%$ 以内^[15], 短焦 $EFL=30\text{ mm}$ 最大畸变 -3.0% , 中焦 $EFL=45\text{ mm}$ 最大畸变 -1.8% , 长焦 $EFL=55\text{ mm}$ 最大畸变 -0.8% , 符合设计要求。

3 公差分析与凸轮曲线拟合

3.1 公差分析

由像质评价结果可知, 理论上该镜头成像质量符合设计要求。但由于光学镜头属于精密仪器, 在加工、装配过程中, 任何微小的误差都会引起成像质量的降低。为了使这些误差在可控范围之内, 还需对该镜头进行公差分析。利用 Zemax 软件公差分析功能, 以衍射 MTF 为评价标准, 在特征频率 100 lp/mm 处进行 200 次蒙特卡洛分析, 通过反复模拟, 不断调整公差, 最终分析结果如表 4 所示。

表 4 蒙特卡罗公差分析结果

Table 4 Results of Monte Carlo tolerance analysis

蒙特卡洛样 本百分比/%	焦距/mm					
	30	35	40	45	50	55
≥ 90	0.3242	0.3305	0.3217	0.3117	0.3041	0.2844
≥ 80	0.3435	0.3528	0.3442	0.3334	0.3333	0.3134
≥ 50	0.3756	0.3917	0.3822	0.3897	0.3824	0.3569
≥ 20	0.4022	0.4259	0.4160	0.4211	0.4226	0.3944
≥ 10	0.4164	0.4373	0.4303	0.4367	0.4383	0.4062

各零件具体允许公差如表 5 所示。由表 5 可知, 公差分配较为合理, 易于加工装配, 可满足实际生产需求。

3.2 凸轮曲线拟合

大孔径宽光谱变焦系统采用机械补偿法进行变焦设计, 需要模拟出该系统的凸轮曲线, 查看凸轮结构是否易于加工。

在焦距 $30\text{ mm} \sim 55\text{ mm}$ 范围内采集 200 个点, 记录数据。以像面为基准面, 焦距为横坐标, 变倍组以变倍组最后一面到基准面的距离为纵坐标, 补偿组以补偿组最后一面到基准面的距离为纵坐标, 其中 6 个主要点的数据如表 6 所示。

根据表 6 得出的数据, 使用 Origin 软件对这些数据进行拟合, 得到变焦系统的凸轮曲线如图 6 所示。由图 6 可看出, 系统凸轮曲线平滑, 易于实际加工。

表 5 零件允许公差

Table 5 Allowable tolerances for parts

面	半径公差 /光圈数	厚度公差 /mm	表面偏心 公差/mm	表面倾斜 公差/(°)	元件偏心 公差/mm	元件倾斜 公差/(°)	表面不 规则度	折射率 公差	阿贝常数 公差/%
1	±4	±0.05	±0.02	±0.04	±0.02	±0.1	±0.5	±0.001	±0.8
2	±4	±0.05	±0.02	±0.04			±0.5		
3	±4	±0.05	±0.02	±0.1	±0.02	±0.1	±0.5	±0.001	±1
4	±4	±0.05	±0.02	±0.04			±0.5	±0.001	±0.5
5	±4	±0.03	±0.02	±0.04			±0.5		
6	±4	±0.03	±0.02	±0.04	±0.02	±0.03	±0.5	±0.0008	±0.4
7	±4	±0.03	±0.02	±0.1			±0.5	±0.001	±0.6
8	±4	±0.03	±0.02	±0.03			±0.5		
9	±4	±0.05	±0.02	±0.03	±0.02	±0.03	±0.5	±0.001	±0.6
10	±4	±0.05	±0.02	±0.1			±0.5		
11	±4	±0.05	±0.02	±0.04	±0.02	±0.06	±0.5	±0.001	±1
12	±4	±0.05	±0.02	±0.1			±0.5		
13	±4	±0.05	±0.02	±0.08			±0.5		
14	±4	±0.05	±0.02	±0.06	±0.02	±0.1	±0.5	±0.001	±1
15	±4	±0.05	±0.02	±0.06			±0.5		
16	±4	±0.05	±0.02	±0.1	±0.02	±0.1	±0.5	±0.001	±1
17	±4	±0.05	±0.02	±0.1			±0.5		
18	±4	±0.05	±0.02	±0.1	±0.02	±0.1	±0.5	±0.001	±1
19	±4	±0.05	±0.02	±0.06			±0.5	±0.001	±0.6
20	±4	±0.05	±0.02	±0.06			±0.5		
21	±4	±0.05	±0.02	±0.06	±0.02	±0.1	±0.5	±0.001	±1
22	±4	±0.05	±0.02	±0.04			±0.5		
23	±4	±0.05	±0.015	±0.04	±0.02	±0.1	±0.5	±0.001	±1
24	±4	±0.05	±0.015	±0.06			±0.5		

表 6 变焦轨迹数据

Table 6 Zoom trajectory data

横坐标/mm	30	35	40	45	50	55
变倍组纵坐标/mm	66.654	61.906	57.879	54.348	51.164	48.222
补偿组纵坐标/mm	7.007	7.244	7.361	7.360	7.239	6.987

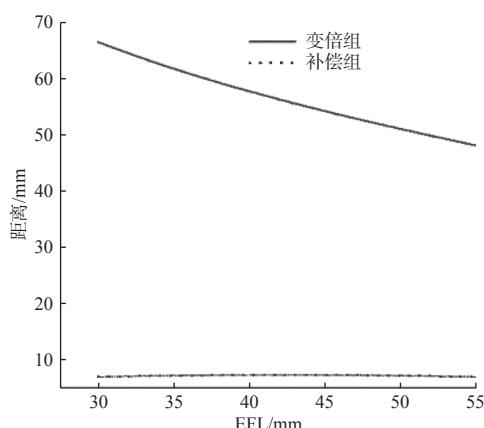


图 6 变焦系统凸轮曲线

Fig. 6 Cam curve of zoom system

4 结论

本文利用 ZEMAX 软件, 设计了一款 F 数为 1.4, 工作波段 400 nm~850 nm 的大孔径宽光谱变焦监控镜头。根据像差理论, 通过多种方法调整结构, 多次优化, 使得该镜头各视场的 MTF 在 100 lp/mm 处均大于 0.4, 星点 RMS 均控制在 4.5 μm 以下, 成像质量较好, 可全天候配合日盲紫外变焦镜头工作。公差分析结果表明, 公差分配合理, 工艺性良好, 均采用国产标准球面玻璃设计, 生产成本低, 有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 康睿思. 用于电晕检测的日盲紫外变焦光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
KANG Ruisi. Design of solar blind UV zoom optical system for corona detection [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [2] 徐苗. 长焦距日盲紫外镜头与日盲紫外双焦距镜头[D].

- 福州: 福建师范大学, 2017.
- XU Miao. Long focal length solar blind UV lens and solar blind UV bifocal lens [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2017.
- [3] 王潇枫, 石岩, 庄一, 等. 变焦结构光成像系统的光学设计[J]. 应用光学, 2018, 39(1): 22-27.
- WANG Xiaofeng, SHI Yan, ZHUANG Yi, et al. Optical design of zoom structured light imaging system[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(1): 22-27.
- [4] 郑国宪, 焦建超, 俞越, 等. 大视场大相对孔径日盲紫外告警光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(2): 167-172.
- ZHENG Guoxian, JIAO Jianchao, YU Yue, et al. Design of solar blind ultraviolet warning optical system with large field of view and large relative aperture[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(2): 167-172.
- [5] 陈骥. 红外连续变焦镜头小型化设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- CHEN Ji. Miniaturization design of infrared continuous zoom lens [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [6] BETENSKY E. Zoom lens NCL 30 ECL 1 NDR 4 NFG 9 COD 02 RLAP COD 72 APN 335151 APD 19811228 PSC 03 CLAS EDF 3: US04466708[P]. 1984-08-21.
- [7] 黄一帆, 李林. 光学设计教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 83-101.
- HUANG Yifan, LI Lin. Optical design tutorial [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009: 83-101.
- [8] JOSEPH M. G. Introduction to lens design with practical ZEMAX examples[M]. Huntsville: Center for Applied Optics, 2002.
- [9] 王靖峰. 变焦距光学系统小型化技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- WANG Jingfeng. Research on miniaturization technology of zoom optical system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [10] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003: 98-101.
- LI Xiaotong, CEN Zhaofeng. Geometrical optics, aberration and optical design [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003: 98-101.
- [11] MILTON Laikin. 光学系统设计[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- MILTON L. Design of optical system[M]. Translated by ZHOU Haixian, CHENG Yunfang. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [12] 王思聪, 王起飞, 陈晓西, 等. 基于曲面传感器的大孔径1300万像素手机镜头设计[J]. 应用光学, 2018, 39(6): 902-907.
- WANG Sicong, WANG Qifei, CHEN Xiaoxi, et al. Design of large aperture 13 million pixel mobile phone lens based on curved surface sensor[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(6): 902-907.
- [13] 孟祥月, 王洋, 张磊, 等. 大相对孔径宽光谱星敏感器光学镜头设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 190-197.
- MENG Xiangyue, WANG Yang, ZHANG Lei, et al. Design of optical lens for star sensor with large relative aperture and wide spectrum[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(7): 190-197.
- [14] 刘宵婵, 陈琛, 单宏, 等. 基于4k分辨率小型投影机的鱼眼镜头设计[J]. 应用光学, 2020, 41(5): 1060-1066.
- LIU Xiaochan, CHEN Chen, SHAN Hong, et al. Design of fisheye lens based on 4k resolution small projector[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(5): 1060-1066.
- [15] 黄文华, 林峰. 大孔径大靶面昼夜型监控镜头光学系统设计[J]. 应用光学, 2016, 37(1): 45-51.
- HUANG Wenhua, LIN Feng. Design of day and night monitoring lens optical system with large aperture and large target surface[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(1): 45-51.