

## 依据近轴光学理论求解双焦系统初始结构

梁 泉<sup>1</sup>, 姜会林<sup>2\*</sup>, 孙 昊<sup>1</sup>, 王春艳<sup>1</sup>, 刘 欢<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;  
2. 长春理工大学 空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 为了快速得到双焦光学系统初始结构, 依据近轴光学理论设计一款双焦、双视场光学系统。通过高斯光学理论及物像交换原则求解光学系统近轴光学元件的初始位置, 分组将标准透镜插入到求解位置上, 通过逐步增大近轴元件的焦距优化镜组及镜片间隔, 使插入的透镜组焦距趋向该近轴元件焦距的理论计算值。以此类推完成每个镜组的优化设计。通过该方法设计了焦距为 40/120 mm、视场为 8.6°/2.9° 的光学系统, 所有镜片均为球面。在奈奎斯特频率 100 lp/mm 处, 120 mm 焦距时调制传递函数为 0.58, 接近衍射极限; 40 mm 焦距时调制传递函数为 0.52。设计结果表明该方法适用于双视场光学系统, 可快速得到光学系统初始结构, 简化了设计难度。

**关键词:** 应用光学; 双焦光学系统; 物像交换原则; 初始结构求解

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200523

## Solving initial structure of bifocal system according to theory of paraxial optics

Liang Xiao<sup>1</sup>, Jiang Huilin<sup>2\*</sup>, Sun Hao<sup>1</sup>, Wang Chunyan<sup>1</sup>, Liu Huan<sup>1</sup>

(1. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;  
2. Institute of Space Photoelectric Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to get the initial structure of the bifocal optical system quickly, a bifocal and dual-field optical system was designed according to the theory of paraxial optics. The initial position of the optical elements near the axis of the optical system was solved by Gauss optics theory and the principle of object and image exchange. The standard lens was inserted into the solution position by grouping. The lens spacing was optimized by gradually increasing the focal length of the elements near the axis, so that the focal length of the inserted lens set approached the theoretical calculated value of the focal length of the element near the axis. Then the method was used to complete the optimal design of each lens set. An optical system with a focal length of 40/120 mm and a field of view of 8.6°/2.9° was designed by this method. All the lenses were spherical. At Nyquist frequency of 100 lp/mm, the modulation transfer function at 120 mm focal length was 0.55, close to the diffraction limit. The modulation transfer function at a focal length of 40 mm was 0.4. The design results show that this method is suitable for dual-field optical system, and the initial structure of optical system can be obtained quickly, which greatly reduces the difficulty of design.

**Key words:** applied optics; bifocal optical system; principle of object-image exchange; solve of initial structure

收稿日期: 2020-12-21; 修订日期: 2021-06-16

基金项目: 吉林省科技发展计划重点研发项目 (20200401048GX); 长春理工大学青年科学基金 (XQNJJ-2018-08)

作者简介: 梁泉, 男, 硕士生, 主要从事光学设计等方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 姜会林, 男, 院士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光学系统设计、空间激光通信等。

## 0 引言

变焦光学系统分为连续变焦和非连续变焦,连续变焦系统设计难度大,对机械结构要求高,其像面稳定性保证困难<sup>[1]</sup>;非连续变焦主要以双焦、双视场光学系统为主,机械结构简单,容易装调且像面稳定<sup>[2]</sup>。双视场既可以搭配使用,又可以单独使用,可以满足不同的应用场合。利用短焦视场大的优点进行搜索、探测、观察;利用长焦测试精度高的优点来获取目标的详细信息,进行识别、确认和测量<sup>[3-5]</sup>。在很多场合,双焦、双视场变焦系统可以替代连续变焦系统,应用于航空、航天、成像告警、搜索与跟踪等军事领域<sup>[6-8]</sup>。

双焦、双视场光学系统比定焦光学系统设计难度大,其初始结构的选取也相对复杂,若通过光学设计软件直接设计出令人满意的双焦光学系统,其初始结构的确定十分重要<sup>[9]</sup>。张葆等和晏蕾等通过三级像差理论求解双视场光学系统的初始结构,求解方法复杂、计算量大<sup>[10-11]</sup>。尹骁等通过寻找专利进行缩放来求解初始结构,采用了七片透镜和两片非球面,该方法不具有通用性<sup>[12]</sup>。

针对上述现状,需寻找一种通用、简便的方法来求解双焦、双视场光学系统初始结构。

## 1 双焦光学系统设计原理及参数求解

双焦光学系统要求在变焦前后像面保持不变。其实现方法有两种:一是增加一个补偿组补偿焦面移动,该方法会增加机械结构的复杂性;二是在透镜移动前后遵循物像交换原则<sup>[13-14]</sup>,保证物像共轭距不变,该方法机械结构简单。文中拟采用第二种设计方式实现。

采用物像交换原则设计双焦光学系统,按前固定组、变倍组和后固定组进行光学划分。其中:前固定组用于会聚无穷远物体的光线;变倍组用于改变焦距,达到变倍的目的;后固定组用于校正像差。

### 1.1 高斯光学理论求解变焦方程

依据高斯提出的理想光学系统几何光学理论,研究近轴区成像规律建立理想光学系统成像模型,计算双焦光学系统光学结构的初始解。

图 1 给出了轴向双焦光学系统结构,当光学系统位于长焦时, $l_{2l}$ 、 $l'_{2l}$ 为变倍组的物距和像距, $d_{23}$ 为后固

定组和变倍组的间隔。当光学系统位于短焦时, $l_{2s}$ 、 $l'_{2s}$ 为变倍组的物距和像距, $d_{12}$ 为变倍组和前固定组间隔。 $AA'$ 为变倍组的共轭距。

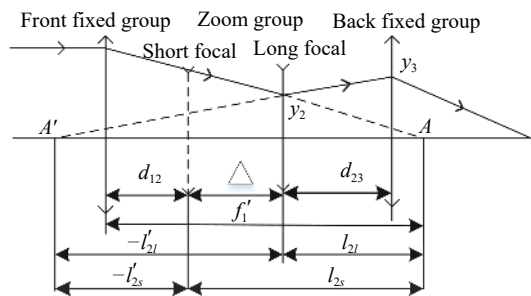


图 1 轴向双焦光学系统结构图

Fig.1 Structure diagram of axial bifocal optical system

### (1) 变倍组相关参数计算

令变倍组焦距为  $f'_2$ , 系统的放大倍率为  $\beta$ , 则短焦和长焦时变倍组的垂轴放大倍率分别为:

$$\beta_{2s} = -\beta^{-1/2} \quad (1)$$

$$\beta_{2l} = -\beta^{1/2} \quad (2)$$

由

$$\frac{1}{l'_{2s}} - \frac{1}{l_{2s}} = \frac{1}{f'_2} \quad (3)$$

可得短焦时变倍组的物距以及像距:

$$l_{2s} = \left( \frac{1}{\beta_{2s}} - 1 \right) f'_2 \quad (4)$$

$$l'_{2s} = (1 - \beta_{2s}) f'_2 \quad (5)$$

由物像交换原则可得长焦时变倍组的物距和像距:

$$l_{2l} = -l'_{2s} = -(1 - \beta_{2s}) f'_2 \quad (6)$$

$$l'_{2l} = -l_{2s} = -\left( \frac{1}{\beta_{2s}} - 1 \right) f'_2 \quad (7)$$

当光学系统从短焦到长焦时,变倍组移动的距离为:

$$\Delta = \left( \frac{1}{\beta_{2s}} - \beta_{2s} \right) f'_2 = \left( \frac{1}{\beta_{2s}} - \frac{1}{\beta_{2l}} \right) f'_2 \quad (8)$$

### (2) 前固定组焦距的计算

在对目标进行搜索和识别时,成像光学系统的物距可以认为是无穷远,则进入前固定组的光线是平行光入射且其光线的出射交点会聚于前固定组的焦平面上,该焦平面即为变倍组的物面。由此可以求出前

固定组的焦距:

$$f'_1 = d_{12} + l_{2s} = d_{12} + \left(\frac{1}{\beta_{2s}} - 1\right) f'_2 \quad (9)$$

(3) 后固定组焦距的计算

当光学系统位于短焦时,令系统的总光焦度为 $\phi$ ,后固定组的光焦度为 $\phi_3$ ,前固定组和变倍组的等效组总光焦度为 $\phi_{12}$ ,等效组像方主平面与后固定组间隔为 $d_{123}$ ,则可以求出后固定组的焦距 $f'_3$ :

$$\phi = \phi_{12} + \phi_3 - d_{123} \phi_{12} \phi_3 \quad (10)$$

$$f'_3 = \frac{1}{\phi_3} \quad (11)$$

### 1.2 求解各组元焦距及间隔

由于进入前固定组的光线为平行光,可得:

$$y_2 = \frac{f'_1 l_{2l}}{2F f'_1} \quad (12)$$

$$y_3 = \frac{y_2(-l'_{2l} + d_{23})}{-l'_{2l}} \quad (13)$$

式中: $f'_1$ 为光学系统位于长焦时的焦距。

为了研究的方便性,针对一个具体问题进行设计分析,根据表 1 给出的具体设计指标要求,展开论述。

表 1 光学系统设计指标

Tab.1 Design index of optical system

Parameter	Value
Wavelength	486-656 nm
Field of view	8.6°/2.9°
Focal length	40 (WFOV) mm 120 (NFOV) mm
Spot diagram	<0.5 pixel@0-0.707 fields <0.7 pixel@0.707-1 fields
MTF	100 lp/mm > 0.3
Temperature	-20-45 °C
CCD pixel	5 μm

在双焦光学系统设计时,首先要确定变倍组焦距。由公式(8)可以看出变倍组的焦距决定了其移动范围,若焦距过大,则移动范围过大;若焦距过小,则其承担的光焦度过大,会引入较大像差导致公差敏感。其次要确定前固定组焦距,由公式(9)可以看出,前固定组焦距和 $d_{12}$ 有关, $d_{12}$ 的选取主要考虑以下两个因素:一是系统的总长,二是主光线进入变倍组的入射高度和入射角度。由公式(9)、(12)可得, $d_{12}$ 越大, $y_2$ 越小,引入像差越少。最后确定后固定组的焦距,

要考虑筒长以及与变倍组之间的距离 $d_{23}$ ,在不与变倍组相碰撞的前提下,由公式(13)可以看出, $d_{23}$ 越小, $y_3$ 越小,引入像差越小。此次设计共采用七片透镜,前固定组和变倍组各两片透镜,后固定组三片透镜。

根据上述选择分析,结合物像交换原则和高斯光学求解方法,得出各组焦距和间隔如下: $f'_1 = 115$  mm, $f'_2 = -35$  mm, $f'_3 = 40$  mm, $d_{12} = 20$  mm, $d_{23} = 10$  mm。

## 2 设计过程

### 2.1 验证初始解的正确性

首先将上述得到的焦距等数据输入 ZEMAX 中,将各组的间隔以及焦距大小设为变量,在评价函数中加入操作数 EFFL 控制焦距;再加入操作数 ZTHI 让长焦和短焦时总长相等,且前固定组和后固定组间隔相等,来保证焦距改变时变化的透镜组只有变倍组。另外,为保证像面稳定,需要在多重结构中将短焦时光学系统的后截距设为变量,长焦时光学系统的后截距设为拾取。进行优化即可得到图 2 所示的近轴光学系统光路图。优化后系统评价函数由 0.000000038 变为 0,各组焦距和间隔分别为  $f'_1 = 115.925$  mm, $f'_2 = -35.111$  mm, $f'_3 = 39.688$  mm, $d_{12} = 20$  mm, $d_{23} = 10.008$  mm。

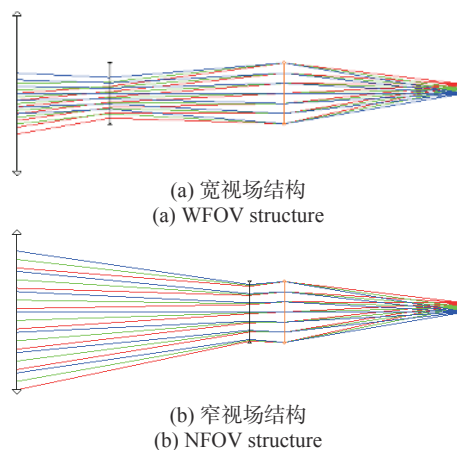


图 2 近轴光学系统光路图

Fig.2 Light path of paraxial optical system

### 2.2 用标准透镜替换近轴面

近轴替代的核心思想是通过使用标准透镜来替代无像差的近轴面,进而再将标准透镜带入的像差优化到设计要求范围。

替换原则:第一步替换后固定组。采用透镜逐个插入法进行替代,在透镜插入系统时,要求其对于系统

的光焦度贡献为 0, 这一步的目的是使插入前后不改变任何光线轨迹。为了在不改变光学系统的情况下完成替代, 需要逐步增加近轴面的焦距值, 使近轴面的焦距接近无穷大, 而插入的标准透镜组的焦距值接近近轴面最初的焦距值, 然后删掉近轴面。在改变焦距的同时需要添加基本操作数控制球差、彗差等初级像差, 并且需要控制透镜的厚度以及折射率, 最后再将模型玻璃替换成真实玻璃。第一步的优化至关重要, 若替换完后其像差过大, 需要进一步优化, 将 RMS 半径优化到 6 个像元以内, 以便于后续替换过程能更好地平衡像差。第一步优化后光路图如图 3 所示, 透镜参数如表 2 所示。

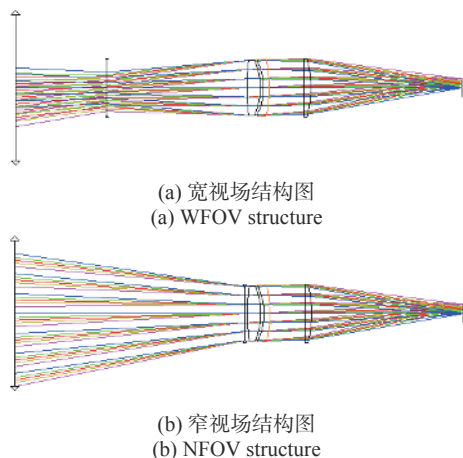


图 3 第一步优化后光路图  
Fig.3 Light path after the first step optimization

表 2 第一步优化后镜片参数

Tab.2 Lens parameters after the first step optimization

Radius/mm	Thickness/mm	Glass
75.183	4.46	Zk13
-23.174	1.063	
-20.456	1.977	Sf6
-43.443	11.686	
914.672	2.267	Sk11
-39.321	50.766	

第二步替换掉变倍组。方法与第一步类似, 逐步插入透镜, 将近轴面的焦距逐步优化到无穷大, 使加入的透镜焦距接近最开始近轴面的焦距, 然后删掉近轴面, 再次进行优化。第二步优化后光路图如图 4 所示, 透镜参数如表 3 所示。

第三步替换掉前固定组。与第一步的步骤一样,

应用相同的过程来替换近轴面, 即得到的初始结构如图 5 所示。表 4 是第三步优化后透镜参数, 表 5 是每

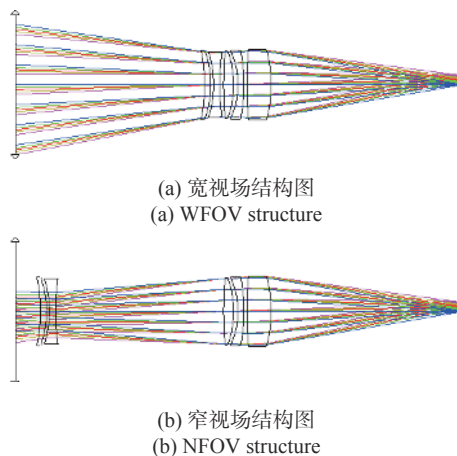


图 4 第二步优化后光路图

Fig.4 Light path after the second step optimization

表 3 第二步优化后透镜参数

Tab.3 Lens parameters after the second step optimization

Radius/mm	Thickness/mm	Glass
-53.012	1.999	P-sf68
-33.681	0.998	
-35.382	1.999	N-lak33b
69.948	56.318/1.357	
128.881	3.276	Zk13
-34.662	1.524	
-26.716	1.999	Sf6
-60.543	0.999	
117.307	8.127	Sk11
-44.078	64.357	

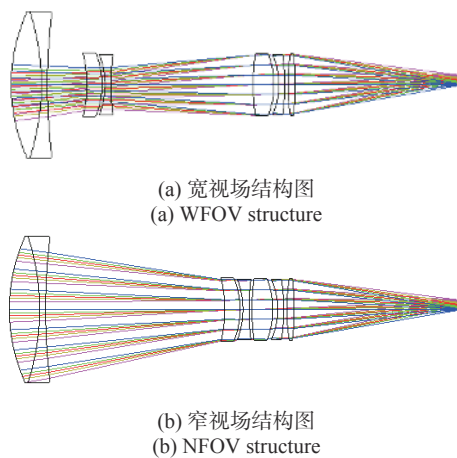


图 5 第三步优化后光路图

Fig.5 Light path diagram after the third step optimization

表 4 第三步优化后透镜参数

Tab.4 Lens parameters after the third step optimization

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Glass
1	57.870	10	Zk12
2	-77.106	2	Kzfs8
3	193.419	13.083/59.282	
4	-42.419	4.997	P-sf68
5	-28.545	1	
6	-27.789	2	N-lak33b
7	77.385	47.197/0.997	
8	78.631	6.895	Zk13
9	-26.74	1.612	
10	-24.316	2	Sf6
11	-62.578	1	
12	60.429	2.496	Sk11
13	-80.595	55.744	

表 5 优化过程中像差大小

Tab.5 The size of aberration during optimization

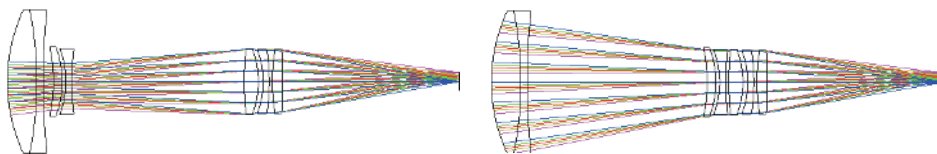
Field	Aberration	First step	Second step	Third step
WFOV	$S_1$	0.039 841	0.028 905	0.009 558
	$S_2$	-0.001 334	-0.002 104	0.000 991
	$S_3$	0.003 687	0.001 254	-0.001 397
	$S_4$	0.004 753	0.000 664	0.001 780
	$S_5$	0.000 835	0.006 641	0.008 469
	$C_L$	-0.002 214	-0.001 471	-0.001 162
	$C_T$	-0.001 464	-0.001 599	-0.000 406
	Maximum RMS radius/ $\mu\text{m}$	25.203	11.011	5.852
	Minimum RMS radius/ $\mu\text{m}$	21.081	10.054	3.684
	NFOV	$S_1$	0.039 844	-0.026 449
$S_2$		-0.001 333	0.001 632	-0.000 895
$S_3$		0.003 687	-0.000 991	0.000 350
$S_4$		0.004 753	0.000 664	0.001 780
$S_5$		0.000 835	0.000 643	0.000 416
$C_L$		-0.002 215	0.003 065	-0.001 473
$C_T$		-0.001 464	-0.000 774	0.000 831
Maximum RMS radius/ $\mu\text{m}$		25.368	11.711	8.691
Minimum RMS radius/ $\mu\text{m}$		20.564	8.984	4.626

一步优化后的像差大小。

### 3 结果分析

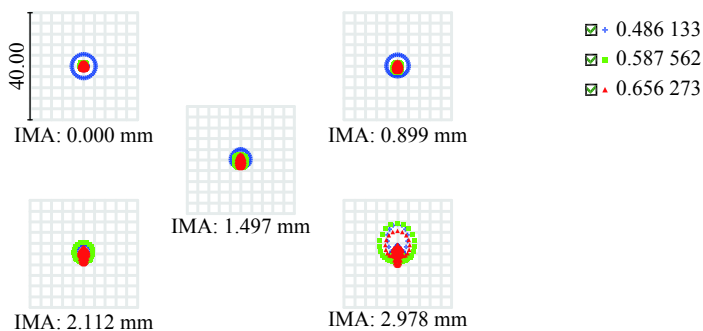
通过确定的初始结构按照像质要求对其进行进一步优化,并将初始结构中不常用的玻璃进行替换,

优化后的系统光路和像差如图 6 所示。在 0-0.707 带视场处点列图皆小于 0.5 个像元大小,全视场处点列图小于 0.7 个像元大小;在宽视场时 MTF 大于 0.52,接近衍射极限,场曲最大为 0.0268 mm,畸变最大为 0.7242%,垂轴色差最大为 0.3  $\mu\text{m}$ ;在窄视场时 MTF



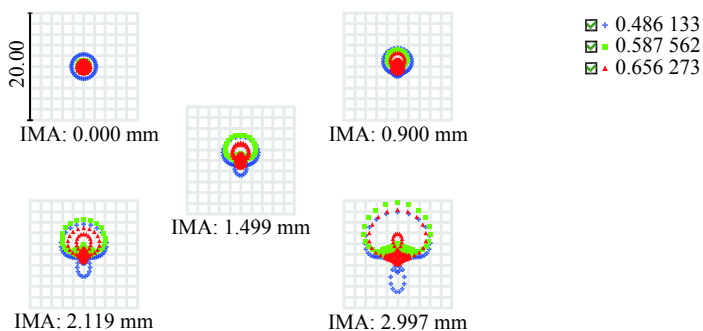
(a1) 宽视场  
(a1) WFOV

(a2) 窄视场  
(a2) NFOV



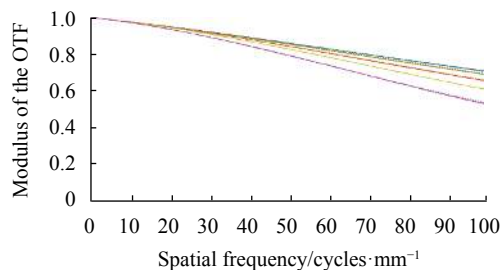
Surface: IMA		Spot Diagram	
2021/6/16		Zemax	
Units are μm. Legend items refer to Wavelengths		Zemax OpticStudio 19.4	
Field :	1 2 3 4 5	lens.ZMX	
RMS radius :	1.719 1.730 1.776 1.994 3.367	Configuration 1 of 2	
GEO radius :	4.451 4.268 3.999 4.199 11.435		
Scale bar :	40 Reference : Chief Ray		

(b1) 宽视场  
(b1) WFOV

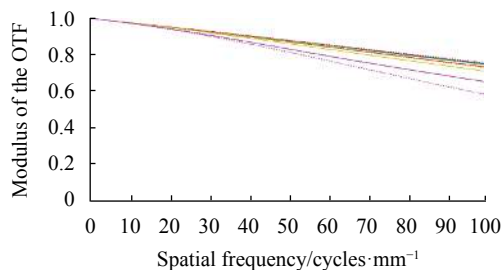


Surface: IMA		Spot Diagram	
2021/6/16		Zemax	
Units are μm. Legend items refer to Wavelengths		Zemax OpticStudio 19.4	
Field :	1 2 3 4 5	lens.ZMX	
RMS radius :	1.029 1.241 1.591 2.113 3.175	Configuration 2 of 2	
GEO radius :	2.286 3.476 4.675 6.506 9.625		
Scale bar :	20 Reference : Chief Ray		

(b2) 窄视场  
(b2) NFOV



(c1) 宽视场  
(c1) WFOV



(c2) 窄视场  
(c2) NFOV



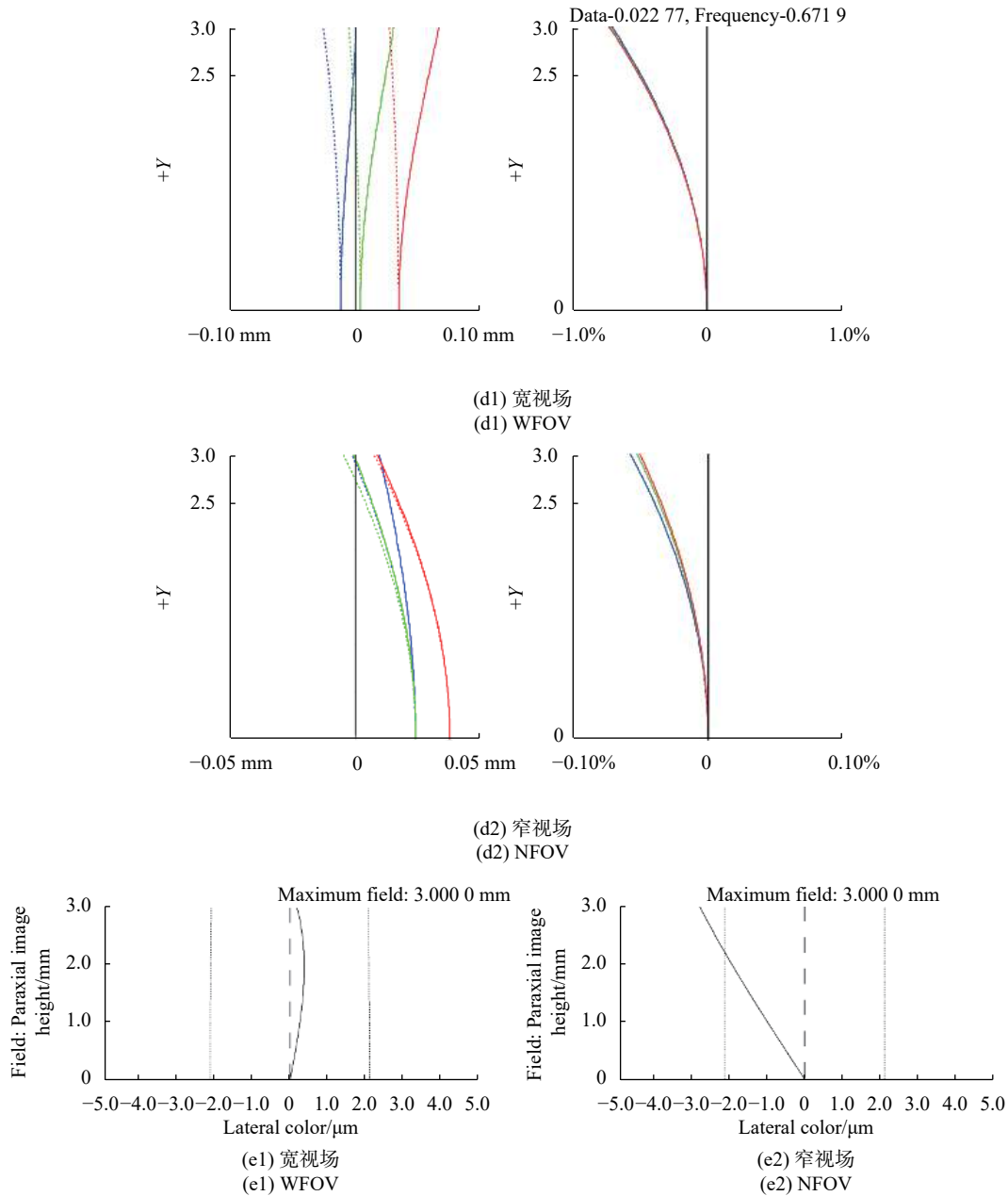


图 6 光路图及像差图。(a) 光路图; (b) 点列图; (c) 调制传递函数; (d) 场曲和畸变; (e) 垂轴色差

Fig.6 Light path and aberration diagram. (a) Light path; (b) Spot diagram; (c) MTF; (d) Field curvature and distortion; (e) Lateral color

大于 0.58, 接近衍射极限, 场曲最大为 0.0289 mm, 畸变最大为 0.0527%, 垂轴色差最大为 2.7  $\mu\text{m}$ 。故该设计满足设计要求。

#### 4 结 论

通过分析目前确定双焦光学系统初始结构方法的缺点, 文中采用实际透镜分步替代各组分的近轴元件来获取初始结构, 该方法的优点是将透镜的初始位置确定即可利用光学设计软件快速设计出双焦光学

系统。在近轴区, 光学系统成理想像, 通过将实际透镜引入光学系统并将带入的像差进行平衡, 得到一个新的初始结构, 再进行优化得出符合要求的设计结果。

采用该方法在未使用特殊面型的情况下, 用七片透镜设计出满足要求的结果, 证明了该方法的有效性。从像质分析可以看出, 该系统满足使用要求, 可降低加工难度, 节约成本, 对装调和系统可靠性提供了保障。为光学设计中确定双焦、双视场初始结构提

供了一个新方法。由于任何实际光学系统都可以看做是一个理想光学系统转换成有像差的光学系统,故该方法具有普适性。

#### 参考文献:

- [1] Xu Zhengkui, Yu Zhenlong, Wang Chunxing, et al. Four piece medium wave dual field of view  $10\times$  optical system [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(9): 824-830. (in Chinese)
- [2] Xu Liang, Zhao Jianke, Zhou Yan, et al. Design of  $8\times$  dual field of view zoom and large relative aperture infrared hybrid refractive/diffractive system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2173-2177. (in Chinese)
- [3] Mao Yankai, Zhao Zhenyu, Zhang Guohua, et al. Optical design of infrared dual-band/dual-field seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190490. (in Chinese)
- [4] Yi Song, Li Shuxiao, Zhu Chengfei, et al. Object tracking with dual field-of-view switching in aerial videos [J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2016, 13(6): 565-573.
- [5] Akram M N, Asghar M H. Step-zoom dual-field-of-view infrared telescope [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(13): 2312-2316.
- [6] Jiang Kai, Zhou Sizhong, Li Gang, et al. Athermalization design of catadioptric middle infrared dual field zoom system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 403-407. (in Chinese)
- [7] Ding Xuezhuan, Zhou Panwei, Wang Shiyong, et al. Optical design of two-stage zoom scanning infrared system with array detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 20200007. (in Chinese)
- [8] Zhang Hongwei, Ding Yalin, Ma Yingjun, et al. Design of infrared dual-band and dual-field imaging early warning system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1283-1294. (in Chinese)
- [9] Shi Guanghui. Find preliminary solution of zoom objective lens using Gaussian optics and third order aberration theory [J]. *Chinese Optics*, 2012, 11(6): 1047-1060. (in Chinese)
- [10] Zhang Bao, Cui Enkun, Hong Yongfeng. Infrared MWIR/LWIR dual-FOV common path optical system [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 395-401. (in Chinese)
- [11] Yan Lei, Jia Ping, Hong Yongfeng. Design of initial structure solution of infrared dual-FOV optical system [J]. *Infrared*, 2011, 32(1): 23-26. (in Chinese)
- [12] Yin Xiao, Li Yingchao, Shi Haodong, et al. Wide-angle zoom polarization imaging optical system design for physical evidence search [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0418006. (in Chinese)
- [13] Bai Yuzhuo, Mu Rui, Ma Lin, et al. Design of infrared optical system with super-long focal length and dual field-of-view [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 631-637. (in Chinese)
- [14] Zheng Yawei, Gao Jiaobo, Wang Jun, et al. Design of an infrared analog optical system for dual field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 77-81. (in Chinese)