

基于 Zemax 的三片式照相物镜设计与优化

王宏哲* 李渊

(上海电机学院 电子信息学院 上海 201306)

Design and Optimization of Triplet Photographic Lens Based on Zemax

WANG Hongzhe*, LI Yuan

(School of Electronic Information Engineering, Shanghai DianJi University, Shanghai 201306, China)

Abstract For the design of the triplet photographic lens, firstly, according to the design requirements, select a similar system from existing patents and documents as the original system. Secondly, the initial structure is scaled by Zemax optical design and simulation software until it meets the design requirements. Finally, the aberration is optimized and corrected by optimizing the surface shape parameters and modulation transfer function (MTF) curve of the lens. A three-piece photographic objective with a focal length of 30 mm, a half-field angle of 25° and an F number of 4 is obtained. The lens consists of a meniscus convex lens, a biconcave lens and a biconvex lens. The design results show that the whole optical system is symmetrical, simple and compact, with a total axis length of 33.83 mm, and the optical system has a small speckle and the maximum distortion is less than 0.017.

Keywords Triplet Photographic Lens, Zemax, Optical design

摘要 对于三片式照相物镜的设计,首先,根据设计要求从已有专利、文献中选取一个与其相近的系统作为原始系统。其次,利用 Zemax 光学设计与仿真软件对初始结构进行整体缩放,直至符合设计要求值。最后,分别通过优化镜头诸面的面形参数及调制传递函数(MTF)曲线对像差进行优化与校正。得到一款焦距为 30 mm,半视场角为 25°,F 数为 4 的三片式照相物镜。该镜头由 1 个弯月凸透镜、1 个双凹透镜和 1 个双凸透镜组成。设计结果表明:整个光学系统为对称式结构,结构简单且紧凑,总轴长度为 33.83 mm,光学系统的弥散斑较小,最大畸变小于 0.017。

关键词 三片式照相物镜 Zemax 光学设计

中图分类号:O439 文献标识码:A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202410005

1893年,英国光学设计师(丹尼斯·泰洛)首次设计了三片式照相物镜的结构,即,对称式柯克三片式镜头。相较于蔡司公司设计的三片式超广角 Hologon 镜头,柯克三片式镜头的设计更为实用,该镜头多用于中、低档照相机镜头市场^[1-4]。近年来,有关实用型柯克三片式照相物镜的设计鲜有报道,并且早前的相关报道也仅仅是停留在初步优化层面,鲜有通过优化整体 MTF 曲线对系统像差进行优化与校正^[5-7]。鉴于此,本文设计了一款三片式照相物镜,半视场角为 25°,焦距为 30 mm,相对孔径为 1/4(入瞳直径/焦距),系统总长为 33.83 mm。在

保证整体像差优异的前提下,最大限度的简化了结构,降低了外形尺寸。

1 设计过程

设计三片式照相物镜的第一步是获取物镜的初始结构参数数据,而获取该数据通常有两种方法。一、待光学系统的类型和设计要求确定后,依据初级像差理论公式建立方程组,通过数值计算求解得到透镜的初始结构参数。二、查询相关专利、文献,选取与设计相近的结构参数,然后利用 Zemax 光学设计与仿真软件对初始结构进行整体缩放,直至符合设计要求值,此方法适用于大部分常见的光

收稿日期:2024-10-22

基金项目:上海市大学生创新创业训练计划项目(S202211458041);上海电机学院引进人才科研启动项目(B1-0288-22-007-05-008);上海电机学院校级重点课程建设项目(A1-0224-24-002-02-027);上海电机学院教材建设项目(A1-0224-24-002-02-082)

* 联系人: E-mail: wanghz@sdju.edu.cn

学系统的设计^[8-14]。鉴于照相物镜属于大视场、大孔径系统,系统结构相对复杂,且系统需要校正全部像差^[15]。所以,本文中所设计的照相物镜的初始结构参数不采用第一种方法来确定,而是依据要求从相关专利、文献中选取一个和设计要求相近的结构参数作为初始结构参数。

设计三片式照相物镜的第二步是对像差进行优化与校正。借助 Zemax 光学设计与仿真软件,对初级像差进行优化。

1.1 设计要求

焦距 30 mm, F 数为 4, 半视场角 25°, 畸变小于 0.015。

1.2 初始结构的确定

按照 F 数相近、同时,兼顾系统总长的原则选取初始结构参数。基于已有设计成果^[12],本文所选取的初始结构参数数据如表 1 中所示。

表 1 初始结构参数^[12]

Tab. 1 Initial structural parameters^[12]

曲率半径 (r/mm)	透镜厚度 (d/mm)	玻璃型号
10.11	2.5	H-ZK11
∞		Nd:1.64,Vd55.4
-11.33	1	F5
11.33 (光阑)		Nd:1.6,Vd38
∞	2.5	H-ZK11
-9.27		Nd:1.64,Vd55.4

从表 1 中的初始结构参数数据可知,原始系统由 2 个厚度均为 2.5 mm 的平凸透镜和 1 个厚度为 1 mm 的双凹透镜组成。型号为 H-ZK11 的玻璃的折射率和阿贝数分别是 1.64 和 55.4, 型号为 F5 的玻璃的折射率和阿贝数分别是 1.6 和 38。2 个空气间隔取 0.7 mm。

1.3 参数输入和缩放

序列模式下,依次对系统选项下的系统孔径、视场、波长进行设置。设定孔径值,当系统孔径中的孔径类型选择“像方空间 F/#”时,孔径值输入“4”,切趾类型选择“均匀”(光强在入瞳均匀分布)。此外,系统孔径中的孔径类型也可以选择“入瞳直径”,此时,孔径值输入“7.5”(单位为 mm),切趾类型同样选择“均匀”。系统孔径设定后,由相对孔径决定的其受衍射限制的最高分辨率(截止频率 f_c)约为

4.25(相对孔径/波长)。设定视场角,添加 Y 角度的 5 个视场。同时,选取 5 个视场比例(0、0.3、0.5、0.707 和 1),权重均为 1,依次对应 0、7.5、12.5、17.675、25。设定波长,因照相物镜属于目视光学系统,所以,将可见光波段(F、d、C)选为当前。又因 F 光和 C 光位于人眼灵敏光谱区的两端,且人眼对于 555 nm 的光波最为敏感,故主波长选择 D 光(588 nm),权重都记为 1。最后,在透镜数据编辑界面输入表 1 中的初始结构参数。其中,在第 6 面“厚度”解的求解类型中选择“边缘光线高度”,此求解方法会调整厚度,使像面上的近轴边缘光线高度为 0,进而得到近轴焦点。此外,为提高透过率,使光的反射率小于 0.01,选取利用光的相消干涉制备的 AR 镀膜玻璃。即,将除光阑以外的各表面镀 AR 膜。最终得到三片式照相物镜的初始二维结构图,如图 1 中所示。从图中可知,光学系统总轴长度为 33.48103 mm。从菜单栏中的分析、报告下的“系统数据摘要”中知其有效焦距为 28.6457 mm,显然不满足本文设计要求(30 mm),因此,需要对其进行缩放。镜头缩放,选择“因子缩放”,输入缩放因子 1.0472776 (30/28.6457),得到焦距为 30 mm 的镜头。与此同时,透镜数据编辑界面的数据也随之改变。

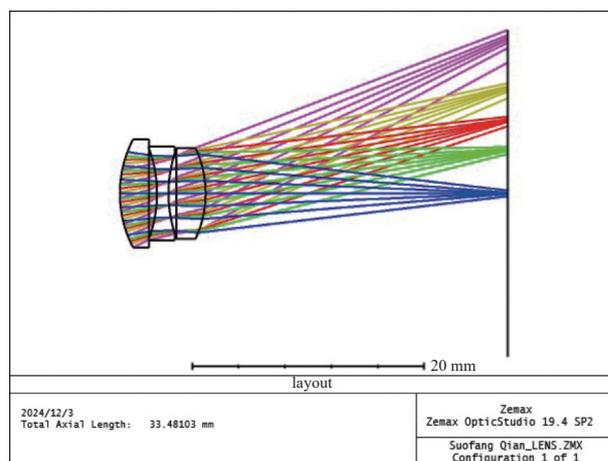


图 1 三片式照相物镜的初始二维结构图

Fig. 1 Initial two-dimensional structure diagram of three-piece photographic objective

1.4 像质评价

点列图,从菜单栏中的分析、光线迹点下的“标准点列图”知其点列图,如图 2 中所示。从图中数据可知,随着视场的增加,由像差引起的弥散光斑的

尺寸逐渐变大,最大视场的 RMS 半径为 $748.252\ \mu\text{m}$,由衍射极限引起的弥散斑(艾里斑),既,该系统在无像差时所达到的最小光斑半径为 $3.067\ \mu\text{m}$ ($1.22\lambda f/d$)。对于一般的照相物镜而言,其弥散斑直径在 $0.03\sim 0.05\ \text{mm}$ ($30\sim 50\ \mu\text{m}$)范围内是可以接受的。而对于高质量的照相物镜,其弥散斑直径均 $< 0.03\ \text{mm}$ ($30\ \mu\text{m}$)。因此,三片式照相物镜的初始点列图的 RMS 半径既不在高质量照相物镜的允许范围内,也不在一般照相物镜的允许范围内,需要进行优化。

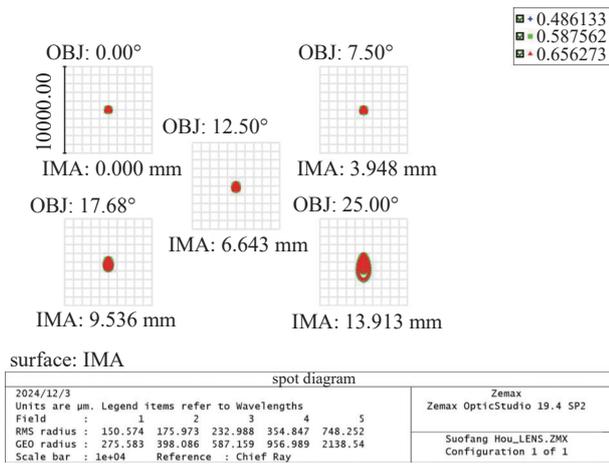


图2 三片式照相物镜的初始点列图

Fig. 2 Initial dot diagram of three-piece photographic objective lens

场曲 FCUR/畸变 DIST/赛德尔图,从菜单栏中的分析、像差分析下的“场曲/畸变”、“网格畸变”和赛德尔图知其场曲/畸变图和赛德尔图,如图 3 中所示。从图 3(a)中数据可知,场曲与视场有关,当最大视场为 25° 时,弧矢场曲(虚线)和子午场曲(实线)分别为 $0.8625\ \text{mm}$ 、 $5.8992\ \text{mm}$,最大畸变为 0.5465% ,同时,可知系统存在像散(子午场曲与弧矢场曲之差)。从图 3(b)中数据图可知,SMIA TV(图形本身的变形情况)畸变值为 -0.2790% ,为负畸变,小于设计要求的 0.015 ,表明系统所选择的初始结构参数比较合理,但仍有可优化的空间。从图 3(c)中可知,系统中第 2、3 两个面的畸变较大,对系统成像质量影响最大。此外,由赛德尔像差系数可知,球差 (SPHA)、彗差 (COMA)、像散 (ASTI)、场曲 (FCUR)、畸变 (DIST)、轴向色差 (CLA)、横向色差 (CTR) 定量值 (累计) 依次为 -0.022539 、 0.009967 、 -0.043909 、 0.041326 、 0.018016 、 -0.000970 、 -0.000922 。

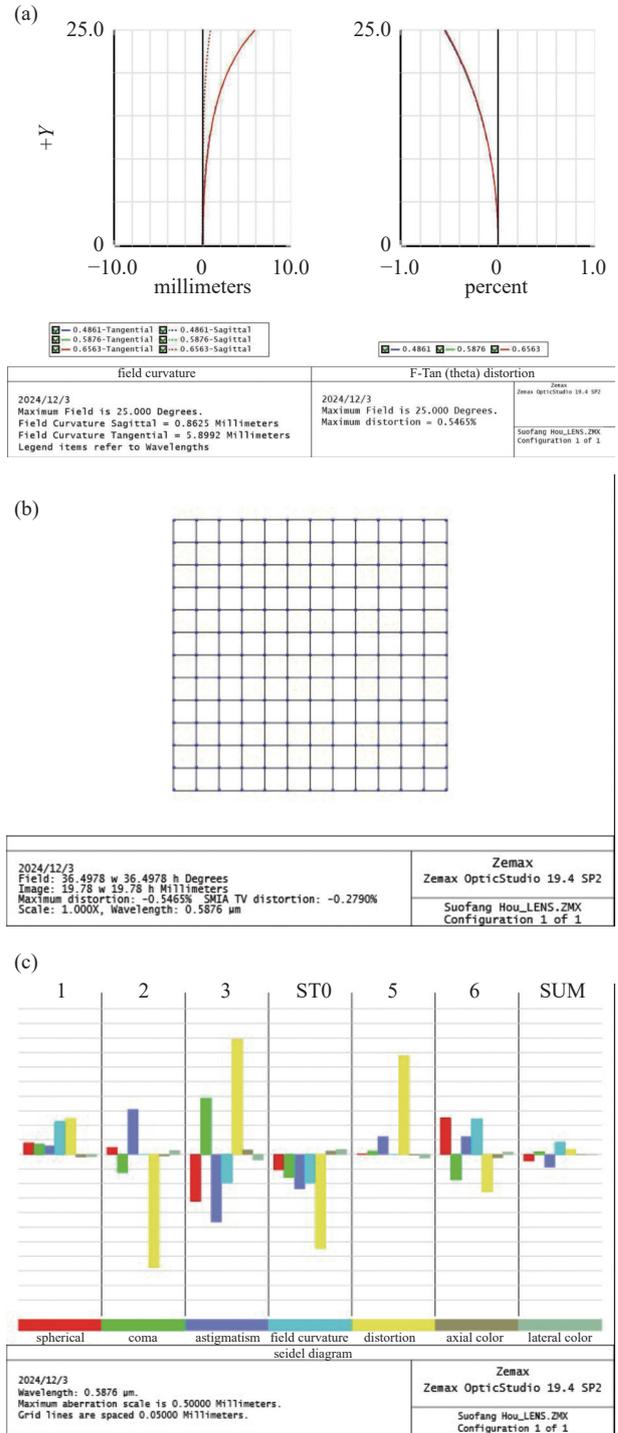


图3 三片式照相物镜的初始场曲/畸变分析。(a)初始场曲/畸变图,(b)网格畸变图,(c)赛德尔图

Fig. 3 Initial field curvature/distortion analyze of three-piece photographic objective. (a) Curvature/distortion diagram, (b) grid distortion diagram, (c) Seidel diagram

1.5 系统优化

1.5.1 确定自变量

将除光阑平面(虚设)以外的 5 个面的曲率半

径在面上的曲率解的求解类型均设为“变量”，同时将第2个面和第4个面厚度在面上的厚度解的求解类型设为“变量”。

1.5.2 建立评价函数

从菜单栏中“优化”选项卡中的“评价函数编辑器”或“优化向导”确定系统最终优化目标。理想情况下，评价函数值越小，光学系统性能越优。图像质量选取“点列图”，优化函数类型为“RMS”，选取“质心”作为参考。光瞳采样，选择高斯求解(3环、6臂、0遮阑)。为防止厚度过大或过小，在“厚度边界”中将玻璃厚度的最小值、最大值和边缘厚度依次设为0.1、10、0.1，将空气间隔的最小值、最大值和边缘厚度依次设为0.1、20、0.1。随后，在操作数中输入需要控制的参数，在操作数中插入2行，分别用来控制有效焦距(EFFL)和最大畸变(DIMX)。目标分别输入30、1.5，权重均输入1。其中，DIMX输入的1.5(绝对值)，不含正负畸变，最终确定初始评价函数为1.28974315。

1.5.3 执行优化

从菜单栏中“优化”选项卡中的“执行优化”实现系统优化设计。选取自动迭代“阻尼最小二乘法”算法，执行自动优化设计。优化后，评价函数降为0.010895169，系统的有效焦距EFFL为29.9992 mm，接近设计要求的30 mm。

2 设计结果

2.1 二维结构图

优化后，三片式照相物镜的二维结构如图4所示。从图中可知，优化后，光学系统总轴长度为33.81602 mm，系统由1个弯月凸透镜、1个双凹透镜和1个双凸透镜组成。

2.2 点列图

点列图，从菜单栏中的分析、光线迹点下的“标准点列图”知其优化后的点列图，如图5中所示。从图中数据可知，优化后，系统在无像差时所达到的最小光斑(艾里斑)半径由最初的 $3.067\ \mu\text{m}$ 降至 $2.794\ \mu\text{m}$ 。此外，5个视场对应的光斑尺寸均大幅下降，其中，视场1对应的最大RMS半径仅为 $53.990\ \mu\text{m}$ ，远小于初始的 $150.574\ \mu\text{m}$ ，符合一般照相物镜的要求。

2.3 场曲/畸变/赛德尔图

从菜单栏中的分析、像差分析下的“场曲/畸

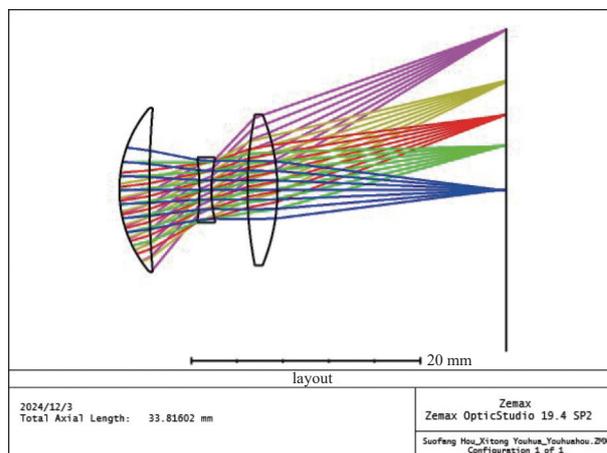


图4 三片式照相物镜优化后的二维结构图

Fig. 4 Two-dimensional structure diagram of optimized three-piece photographic objective

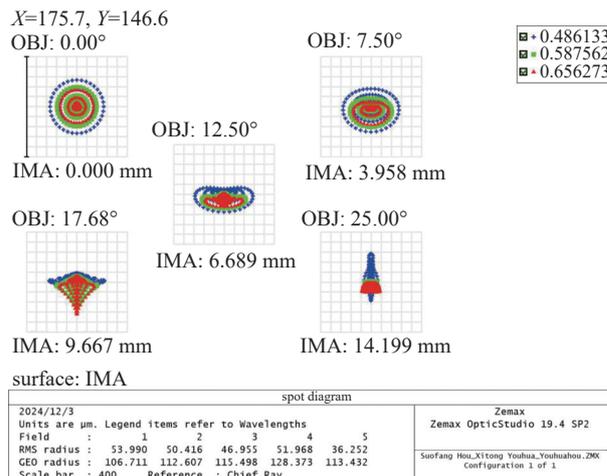


图5 优化后的三片式照相物镜的点列图

Fig. 5 Point diagram of optimized three-piece photographic objective

变”、“网格畸变”和赛德尔图知其优化后的场曲/畸变/赛德尔图，如图6中所示。从图6(a)中数据可知，优化后，场曲仍与视场有关，且当最大视场为 25° 时，弧矢场曲(虚线)和子午场曲(实线)分别减小至 $0.5712\ \text{mm}$ 、 $0.7685\ \text{mm}$ ，最大畸变为 1.6040% 。最大畸变较优化前(0.5465%)略有增大，但仍接近满足设计要求。此外，系统存在的像散也有所降低(子午场曲与弧矢场曲之差)。从图6(b)中数据图可知，SMIA TV畸变值为 0.3132% ，由最初的负畸变转为正畸变。从图6(c)中可知，系统中所有面的畸变均有所降低。此外，由赛德尔像差系数可知，球差、彗差、像散定量值(累计)依次减小至 0.019657 、 0.004879 、 -0.027378 。

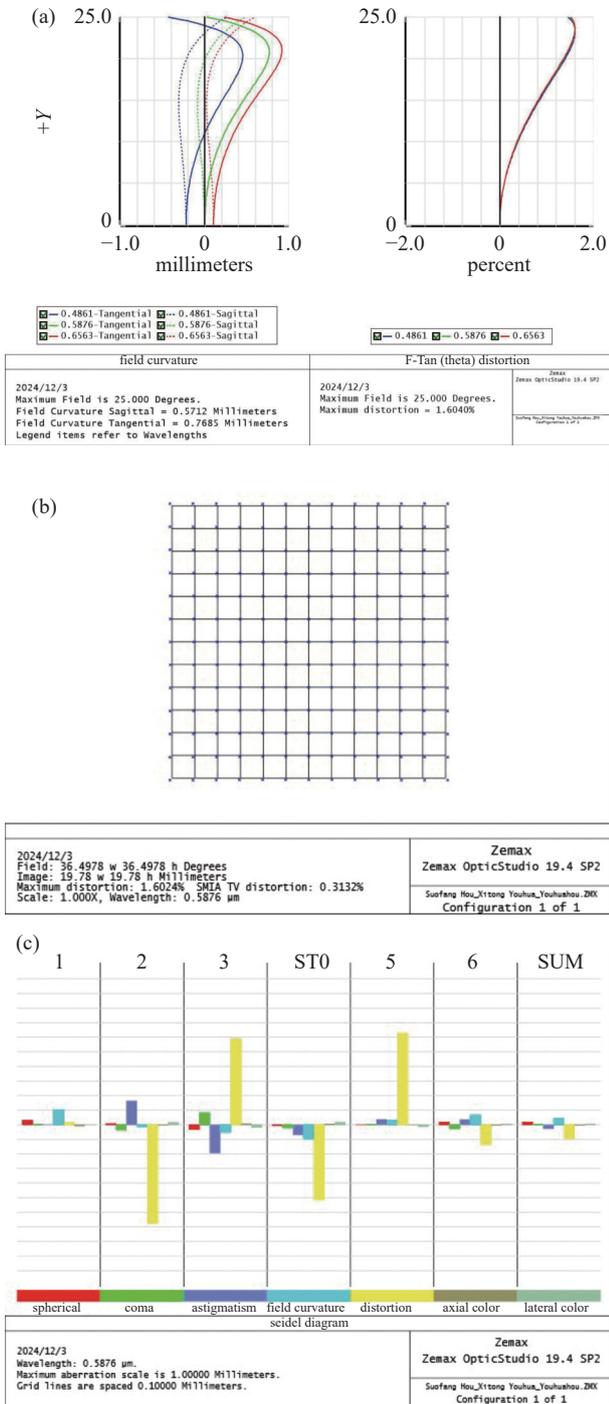


图6 优化后的三片式照相物镜的场曲/畸变分析。(a)场曲/畸变图, (b)网格畸变图, (c)赛德尔图

Fig. 6 The field curvature/distortion analyze of the optimized three-piece photographic objective. (a) Curvature/distortion diagram, (b) grid distortion diagram, (c) Seidel diagram

2.4 衍射 (调制传递函数/MTF) 数据

为描述像面上的对比度和通过聚焦的像空间上每毫米周期数(Cycles/mm)之间的对应关系, 即,

像面上的对比度和空间频率之间的关系。基于夫琅禾费衍射理论, 利用快速傅里叶变换对全部视场位置计算衍射 MTF 数据, 获取不同空间频率下的物方正弦强度空间频率的函数模数(正弦波物体的调制函数)。从菜单栏中的分析、MTF 曲线下的“FFT MTF”图得其优化后的衍射 MTF 数据, 如图 7 中所示。图中的黑线为衍射极限下的成像结果, 即, 相对孔径相同时, 无像差的透镜组所能达到的最好对比度。图中结果显示: 低频端的 OTF 值趋于 1, 这是因为空间频率越小, 由光波衍射造成的影响就越弱。而随着空间频率的增大, OTF 模值逐渐降低, 这是因为在较高空间频率下, 光波衍射造成的影响增强。在低频区域(10 Cycles/mm), 5 个视场的边缘 OTF 模值均在 0.2907 以上, 远高于人眼最低可识别的 OTF 模值(≈ 0.05), 与一般镜头中 OTF 模值(0.3)相近, 这表明三片式照相物镜镜头具有相对较好的对比度。在高频区域(30 Cycles/mm), 除第 4 视场子午线和第 5 视场弧矢曲线外, 其余视场的 OTF 模值均在 0.1332 以上, 但总体而言, 高频区 OTF 值仍然偏低, 表明系统的分辨率仍有进一步优化的空间。此外, 系统每个视场中的弧矢曲线与子午曲线均有一定程度的偏离, 且部分曲线呈现波浪状, 这表明系统存在不同程度大小的色散、色差及像场弯曲。

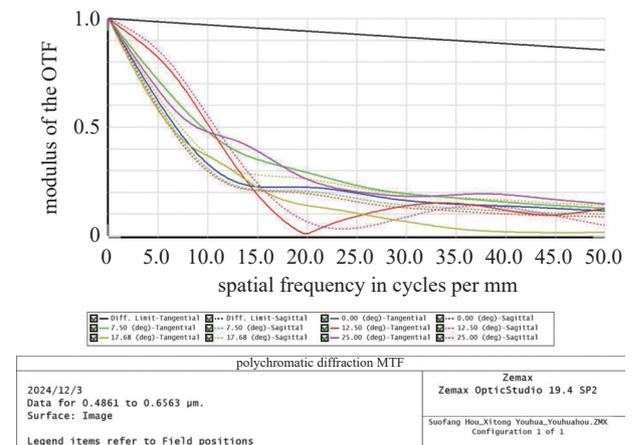


图7 系统优化后的初始 MTF 曲线

Fig. 7 Initial MTF curve after system optimization

为从整体上衡量三片式照相物镜镜头的分辨率和对比度, 对 MTF 曲线进行整体优化。首先, 选择均方根波前差评价函数(默认)进行初步优化, 即, 优化函数中, 图像质量选择“波前”, 优化函数类型为“RMS”, 选取“质心”作为参考。光瞳采样, 选取

高斯求积(3环、6臂、0遮阑)。厚度边界,将玻璃厚度的最小值、最大值和边缘厚度依次设为0.1、10、0.1,将空气间隔的最小值、最大值和边缘厚度依次设为0.1、20、0.1,执行初始优化。随后,图像质量选为“对比度”,设置空间频率(50 Cycles/mm)、弧矢权重与子午权重均为1。光瞳采样,选取高斯求积(4环、6臂、0遮阑),厚度边界,将玻璃厚度的最小值、最大值和边缘厚度依次设为0.1、10、0.1,将空气间隔的最小值、最大值和边缘厚度依次设为0.1、20、0.1。在操作数中另插入18行,类型分别为MTFT(4行、子午方向/切向调制函数)、OPGT(4行、操作数大于)、MTFS(4行、弧矢方向/径向调制函数)、OPGT(4行、操作数大于)、EFFL(1行、控制有效焦距)、DIMX(1行、控制最大畸变)。MTFT行:依次设定采样为2,视场选取第2、3、4、5个视场,空间频率为50 Cycles/mm,目标为空,权重为空,提取评估值。OPGT行:依次设定操作数1、3、5、7,目标输入0.5~0.7(>评估值),权重设为1。MTFS行:依次设定采样为2,视场选取第2、3、4、5个视场,空间频率为50 Cycles/mm,目标为空,权重为空,提取评估值。OPGT行:设定操作数9、11、13、15,目标输入0.5~0.7(>评估值),权重设为1。EFFL行:输入目标30,权重为1。DIMX行:输入目标1.5,权重为1。整体执行优化,优化后的点列图、畸变图以及MTF曲线如图8中所示。从点列图中可知,优化MTF曲线后,系统在无像差时所达到的最小光斑(艾里斑)半径为 $2.817\ \mu\text{m}$ 。此外,5个视场对应的光斑尺寸均低于第一次优化值,其中,视场4对应的最大RMS半径仅为 $40.332\ \mu\text{m}$,基本符合高质量照相物镜的要求。从MTF曲线中可知,低频区域(10 Cycles/mm)的5个视场的边缘OTF模值均在0.3488以上,高于初次优化的OTF模值(0.2907),三片式照相物镜镜头的对比度得到显著改善。高频区域的OTF模值均优于第一次优化模值,显然,系统的分辨率也得到明显改善。此外,与第一次优化后相比,最大视场时的弧矢场曲和子午场曲分别由原来的0.5712 mm、0.7685 mm减小至0.3536 mm、0.6286 mm,最大畸变为1.6283%,尽管较第一次优化后(1.6040%)略有增大,但仍接近满足设计要求。同时,系统存在的像散也较第一次优化后有所降低(子午场曲与弧矢场曲之差)。

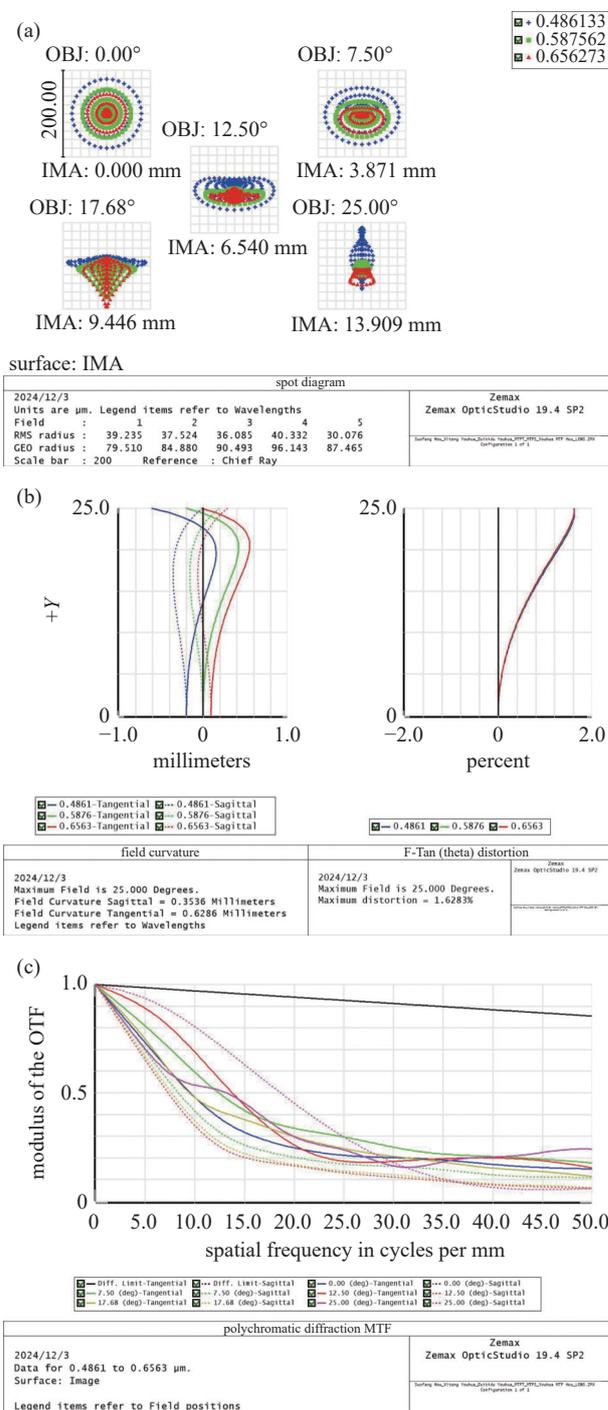


图8 优化MTF整体曲线后的分析。(a)点列图,(b)场曲/畸变图,(c)MTF曲线

Fig. 8 Analyze after optimizing the overall MTF curve. (a) Point series diagram, (b) field curvature/distortion diagram, (c) MTF curve

3 结论

本文在Zemax光学设计与仿真软件中分别通过优化镜头诸面的面形参数及MTF曲线对像差进行优化与校正,获得一款焦距为30 mm,半视场角

为 25°, F 数为 4 的三片式照相物镜, 镜头参数如表 2 所示。该系统由 1 个弯月凸透镜、1 个双凹透镜和 1 个双凸透镜组成。系统结构简单且紧凑, 总轴长度为 33.83 mm。系统的弥散斑较小, 最大畸变为 0.016283。设计结果表明: 全视场 OTF 模值在空间频率 10 Cycles/mm 时均高于 0.3537, 满足一般镜头对 OTF 模值的要求 (>0.3)。各种像差评价结果表明, 系统成像质量较好, 适用性强。

表 2 镜头参数

Tab. 2 Lens parameters

参数名称	参数值
有效焦距 (EFL)	30 mm
视场角 (FOV)	50°
F 数 (F#)	4
光学总长 (TTL)	33.83 mm
TV 畸变 (光阑)	1.6283%
透镜片数	3
材料	光学玻璃

参 考 文 献

- [1] Yang G M. An analytic design method of Cooke triplet lenses with the back stop[J]. Journal of East China Institute of Technology, 1990(2): 12-18 (杨观鸣. 三片型后光阑照相物镜解析法设计的研究 [J]. 华东工学院学报, 1990(2): 12-18 (in Chinese))
- [2] Yang W Z. The design of new triplet photo objective[J]. Optical Technique, 1988(5): 28-36 (杨文哲. 新型三片式照相物镜设计 [J]. 光学技术, 1988(5): 28-36 (in Chinese))
- [3] Yang W Z. 135 Photograph lens of a new type triplet with conventional glass[J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1988(3): 122-127 (杨文哲. 用普通玻璃设计新型三片式 135 照相物镜 [J]. 长春光学精密机械学院学报, 1988(3): 122-127 (in Chinese))
- [4] Ji Z J, Bao J Q, Liu X B. ZEMAX optical system design training course[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2018 (吉紫娟, 包佳祺, 刘祥彪. ZEMAX 光学系统设计实训教程 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2018 (in Chinese))
- [5] Xi R J, Xiao S J, Yang H, et al. Research on the imaging quality of optical lens[J]. Physics Experimentation, 2019, 39(5): 42-46 (席瑞骏, 肖双江, 杨慧, 等. 光学镜头成像质量研究 [J]. 物理实验, 2019, 39(5): 42-46 (in Chinese))
- [6] Zhao Y, Zhou L F. Optical imaging quality control of photographic lens-the influence of key lens indexes on photographic creation II[J]. Advanced Motion Picture Technology, 2018(8): 57-60 (赵阳, 周令非. 摄影镜头的光学成像质量控制-镜头关键指标对摄影创作的影响 (下)[J]. 现代电影技术, 2018(8): 57-60 (in Chinese))
- [7] Zhao X. Application of MTF modulation transfer function in satellite remote sensing images[J]. Computer Products and Circulation, 2018, 7(8): 72 (赵翔. MTF(调制传递函数)在卫星遥感影像中的应用 [J]. 计算机产品与流通, 2018, 7(8): 72 (in Chinese))
- [8] Xu Q Z, Yang P, Wang H W, et al. Optical design of miniaturized laser communication receiving telescope with long exit pupil distance[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 975-981 (徐乾智, 杨鹏, 王海伟, 等. 小型化长出瞳距激光通信接收望远镜光学设计 [J]. 应用光学, 2023, 44(5): 975-981 (in Chinese))
- [9] Li Y Q, Nan Y B, Chen Y Q, et al. Research and progress on optical design of exposure systems in extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(15): 1522002 (李艳秋, 南雁北, 陈雨情, 等. 极紫外光刻机曝光系统光学设计研究与进展 [J]. 光学学报, 2023, 43(15): 1522002 (in Chinese))
- [10] Kong X X, Xue C X. Optical design of dual-focal-plane head-up display based on dual picture generation units[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 1422003 (孔祥旭, 薛常喜. 基于双图像生成器的双焦面抬头显示系统光学设计 [J]. 光学学报, 2022, 42(14): 1422003 (in Chinese))
- [11] Wei W, Hu Z F, Xia Z F, et al. Design and analysis of micro-photographic lenses with large aperture and high resolution[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2016, 33(6): 67-71 (魏威, 胡正发, 夏智锋, 等. 大光圈微型高清照相物镜的设计和性能分析 [J]. 广东工业大学学报, 2016, 33(6): 67-71 (in Chinese))
- [12] Yuan X C. Optical design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988 (袁旭沧. 光学设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988 (in Chinese))
- [13] Xiao Z X. Engineering optical design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003 (萧泽新. 工程光学设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003 (in Chinese))
- [14] Wang W S, Mou D, Chen Y, et al. Contemporary optical system design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016 (王文生, 牟达, 陈宇, 等. 现代光学系统设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016 (in Chinese))
- [15] Hou G Z, Lv L J. Design of ultra wide-angle photographic objective based on ZEMAX[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(3): 441-445 (侯国柱, 吕丽军. 基于 ZEMAX 的超广角照相物镜设计 [J]. 应用光学, 2016, 37(3): 441-445 (in Chinese))