

紧凑型双视场可见光镜头设计

周恩源, 曹月芹, 施建萍, 常波, 张金辉, 卢稳厚, 张璋, 邢美华, 卢国俊

(北方信息控制研究院集团有限公司, 江苏南京 211153)

摘要: 为使观瞄系统以简单、紧凑结构实现探测、识别目标功能, 选用光学补偿法设计紧凑型双视场可见光镜头。首先, 根据视场、作用距离指标完成相机选型和焦距计算, 依据已选相机像元尺寸和最低照度计算 F 数, 并分析双视场光学系统的特点; 其次, 对比常规的光阑位置固定方案与光阑位置切换方案, 得出后者在实现光学总长、最大通光孔径、变焦行程有效压缩的同时, 可以实现更大的相对孔径和更好的像质; 最终, 选用光阑位置切换方案设计了由 11 片透镜构成, 光学总长为 150 mm, 最大通光孔径为 $\Phi 42$ mm, 变焦行程为 35.97 mm 的紧凑型双视场可见光镜头。该镜头短焦焦距为 32 mm, F 数为 2.3, 满足水平视场角不小于 12° 、探测距离不小于 5 km 的要求; 长焦焦距为 126 mm, F 数为 3, 满足水平视场角不小于 3° 、畸变小于 0.5%、识别距离不小于 5 km 的要求。设计结果表明, 对于焦距 32 mm 和焦距 126 mm, 全视场调制传递函数 (MTF) 均大于 0.45, 全视场点列图的均方根 (RMS) 直径小于或接近 $4 \mu\text{m}$, 整体像质良好。公差分析结果表明, 在 135 cycles/mm 处, 全视场 MTF 大于 0.3 的概率达到 90% 以上。

关键词: 光学设计; 双视场; 光学变焦; 紧凑

中图分类号: TH703; TN202 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210042

Design of compact dual-field lens for visible light

Zhou Enyuan, Cao Yueqin, Shi Jianping, Chang Bo, Zhang Jinhui,
Lu Wenhui, Zhang Zhang, Xing Meihua, Lu Guojun

(North Information Control Research Academy Group Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

Abstract: To make observing and sighting system realize detecting and recognizing function with simple and compact structure, optical compensation method is selected to design compact dual-field lens working at visible light. Firstly, camera was selected and focal length was calculated according to specifications of filed angle and operating range, F number was calculated according to pixel size and minimal illumination of the selected camera, the characters of dual-field optical system were analyzed. Secondly, conventional fixed stop position scheme and switchable stop position scheme were compared, it was concluded that the latter realized total optical length, maximal effective aperture, zoom stroke compressed and larger relative aperture, better image quality. Finally, compact dual-field lens working at visible light composed of 11 lenses, with total optical length 150 mm, maximal effective aperture $\Phi 42$ mm, zoom stroke 35.97 mm was designed by switchable stop position scheme. The lens's parameters were: short focal length was 32 mm, F number was 2.3, met the requirements that horizontal field angle was larger than 12° and detecting range was farther than 5 km; long focal length was 126 mm, F number was 3, met the requirements that horizontal field angle was larger than 3° , distortion was less than 0.5%, and recognizing range was farther than 5 km. Designing results show that for short focal length 32 mm and long focal length 126 mm, MTF curves of all fields get higher than 0.45, RMS spot diagrams of all fields are less

收稿日期: 2021-01-04; 修订日期: 2021-04-14

作者简介: 周恩源, 男, 工程师, 硕士, 主要从事光学设计方面的研究工作。

than or close to 4 μm, image quality is good enough. Tolerance analysis showed, at 135 cycles/mm, the probability that MTF curves of all fields were higher than 0.3 was 90% above.

Key words: optical design; dual-field; optical zoom; compact

0 引言

现代战争中,对远距离目标的探测和识别是实现精确打击的先决条件。通常,搜索、探测目标时观瞄系统处于短焦、宽视场状态,识别、跟踪目标时观瞄系统处于长焦、窄视场状态。定焦镜头无法同时满足上述两种需求,变焦镜头可通过短焦和长焦的切换实现探测功能和识别功能的切换^[1-3]。变焦系统可分为机械补偿变焦系统和光学补偿变焦系统。机械补偿变焦系统一般由前固定组、变焦组、补偿组、后固定组组成,变焦过程变焦组作线性运动,补偿组作非线性运动,通过机械凸轮使像面在整个变焦过程中维持稳定,但这种系统结构复杂,空间尺寸较大,光轴一致性难以保证;和机械补偿变焦系统相比,光学补偿变焦系统只需变焦组轴向移动即可实现两档变焦,无需补偿组,具有结构简单、紧凑,光轴一致性容易控制的优势^[4-7]。对于宽视场实现目标探测、窄视场实现目标识别的应用场景,双视场光学变焦系统优势明显。

目前,国外变焦镜头设计的主要研究方向^[8-9]是使用液体透镜、电动变焦透镜等改变光学系统局部光学元件的焦距以实现整个光学系统焦距的变化,从而避免元件的轴向移动,实现系统的紧凑化。但以上技术目前成熟度和可靠性不足,使用条件和范围受限;国内变焦镜头设计的研究^[1-2, 6, 10-11]主要停留在针对 720P 及以下的标清相机,设计过程也很少论及作用距离与环境照度、能见度、相机最低工作照度等参数的关系。文中采用将短焦和长焦光阑设置在不同位置的光阑位置切换方案,针对 1080P 高清相机,根据设计指标,考虑最低环境照度下的正常使用,设计一款短焦焦距为 32 mm、长焦焦距为 126 mm 的紧凑型双视场可见光镜头,分别用于搜索、探测和识别、跟踪目标。

1 光学系统设计

1.1 设计指标

某光电观瞄系统的光学相关技术指标见表 1。

表 1 光电观瞄系统光学相关指标

Tab.1 Related optical indicators of observing and sighting system

Parameters	Specifications
Horizontal field angle/(°)	≥12(Detection)≥3(Recognition)
Dimension of target/m	4.6×2.3(Equivalent length: 3.3)
Operating range/km	≥5
Atmospheric visibility/km	≥10
Ambient illuminance/lux	≥300
Distortion	≤0.5%(Detection)

1.2 相机选型和焦距计算

设所选相机有效像元数为 $M(H) \times N(V)$, 像元尺寸为 $a \times a$, 单位为 μm, 短焦焦距为 f'_s , 长焦焦距为 f'_L , 单位为 mm。短焦状态和长焦状态对 5 km 处目标成像所占像元数 N_1 和 N_2 分别可以表示为:

$$N_1 = \frac{3.3f'_s}{5000a} \quad (1)$$

$$N_2 = \frac{3.3f'_L}{5000a} \quad (2)$$

根据 Johnson 准则,以 95% 概率探测和识别目标时,所需条带周期数分别约为 2 和 8^[12], 对应所需像素数分别为 4 和 16, 根据技术指标需满足:

$$N_1 = \frac{3.3f'_s}{5000a} \geq 4 \quad (3)$$

$$N_2 = \frac{3.3f'_L}{5000a} \geq 16 \quad (4)$$

设短焦状态水平视场角为 ω_{sS} , 长焦状态水平视场角为 ω_{sL} , 根据技术指标需满足:

$$\omega_{sS} = 2 \arctan \left(\frac{M \times a}{2f'_s} \right) \geq 12^\circ \quad (5)$$

$$\omega_{sL} = 2 \arctan \left(\frac{M \times a}{2f'_L} \right) \geq 3^\circ \quad (6)$$

将公式 (3)~(4) 分别代入公式 (5)~(6) 可知, M 应满足不小于 1274。720P 相机水平方向有效像元数为 1280, 为预留足够的设计余量保证视场和作用距离都

满足要求,在该设计中选用 1080P 相机,其具体参数如表 2 所示 (1 in=2.54 cm)。

表 2 所选用 CMOS 相机的相关参数

Tab.2 Related specifications of the CMOS image sensor used

Parameters	Specifications
Image sensor	1/1.9 in CMOS image sensor
Valid pixels	1 920(H) × 1 080(V)
Pixel size	3.75 μm(H) × 3.75 μm(V)
Minimal illumination	0.1 lx

将 $M = 1\ 920$, $N = 1\ 080$, $a = 3.75\ \mu\text{m}$ 代入公式 (3)~(6) 可得:

$$22.73\ \text{mm} \leq f'_s \leq 34.25\ \text{mm} \quad (7)$$

$$90.91\ \text{mm} \leq f'_l \leq 137.48\ \text{mm} \quad (8)$$

光学系统的变倍比应介于 2.7~6 之间,为保证足够设计余量,取中间值较为合适。

1.3 F 数计算

F 数是光学系统的重要指标之一,其数值大小与理论分辨率、像面照度密切相关。F 数越小,光学系统的理论分辨率越高,像面照度越强,但作为 F 数倒数的相对孔径会增大,从而提升设计难度。以下分别根据相机像元尺寸和相机最低工作照度计算 F 数的取值范围。

通常,艾里斑半径和直径的倒数分别被认为是光学系统的截止频率和中间频率。在确定 F 数时,艾里斑直径所占像元数为 1~2 个^[10]。在空气中,物镜的艾里斑直径可以表示为^[13]:

$$D = 2.44\lambda F \quad (9)$$

艾里斑占 1 个像素时,可得:

$$F = \frac{a}{2.44\lambda} \quad (10)$$

将 D 光波长 $0.5893\ \mu\text{m}$ 代入公式 (10) 可得 $F = 2.61$ 。同理,当艾里斑占 2 个像素时,计算可得 $F = 5.22$ 。因此,F 数取值不宜大于 5.22,且越小越好。

光学系统像面照度 E_1 可以表示为^[14]:

$$E_1 = \frac{E_T \gamma T_0 e^{-\alpha R}}{4F^2} \quad (11)$$

式中: E_T 表示观察目标附近的环境照度,单位为 lx; γ 表示目标表面对可见光的反射率; T_0 表示光学系统的透过率; α 表示大气衰减系数,单位为 km^{-1} ; R 表示

目标与光学系统的距离,单位为 km。在该设计中, E_T 为 300 lx, γ 取 0.2, T_0 取 0.8, R 为 5 km。 α 可以表示为^[15]:

$$\alpha = \frac{3.912}{V} \quad (12)$$

式中: V 为大气能见度,在该设计中为 10 km,可求得 α 为 $0.3912\ \text{km}^{-1}$ 。已知所选相机的最低工作照度 E_d 为 0.1 lx,因此必须满足:

$$E_1 = \frac{E_T \gamma T_0 e^{-\alpha R}}{4F^2} = \frac{300 \times 0.2 \times 0.8 e^{-0.3912 \times 5}}{4F^2} \geq E_d = 0.1 \quad (13)$$

可求得 $F \leq 4.12$ 。

综合考虑相机像元尺寸和最低照度, F 数要满足不大于 4.12。

1.4 理论分析

对于双视场光学系统,变焦组轴向移动实现长焦状态和短焦状态切换,满足物像交换原则^[5],以下分析前固定组和变焦组。设 M 为变倍比,短焦状态变焦组对前固定组的轴向放大率 β_{2S} 可以表示为:

$$\beta_{2S} = -\frac{1}{\sqrt{M}} \quad (14)$$

长焦状态变焦组对前固定组的轴向放大率 β_{2L} 可以表示为:

$$\beta_{2L} = -\sqrt{M} \quad (15)$$

设变焦组的焦距为 f'_2 ,根据高斯公式可得:

$$l = \frac{(1-\beta)f'_2}{\beta} \quad (16)$$

焦距切换时,变焦组的移动量可以表示为:

$$\Delta = \left[\frac{(1-\beta_{2S})}{\beta_{2S}} - \frac{(1-\beta_{2L})}{\beta_{2L}} \right] f'_2 = \left(\frac{1}{\sqrt{M}} - \sqrt{M} \right) f'_2 \quad (17)$$

分析公式 (17) 可知,当变倍比恒定时, Δ 与 f'_2 的绝对值成正比,为缩短切换时间, f'_2 的绝对值要尽量小。

2 设计结果

2.1 光学系统结构

依据以上计算、分析,取光学系统的变倍比为 4,运用高斯公式计算光学系统的初始结构,并在光学设计软件 Code V 中用理想透镜进行模拟,参考光学设计手册和相关专著^[16-17]对光学系统进行复杂化设计,

同时约束光学总长、最大通光孔径、变焦组焦距等参数,并选用 CDGM 玻璃库提供的普通光学材料。优化过程首先采用常规的光阑位置固定方案,得到光学总长为 170 mm,最大通光孔径为 $\Phi 52$ mm,变焦行程为 62.60 mm 的双视场光学系统,图 1、图 2 分别为焦距 32 mm、焦距 126 mm 光学系统图,表 3 为具体参数。



图 1 光阑位置固定方案焦距 32 mm 光学系统图

Fig.1 Diagram of 32 mm focal length optical system with fixed stop position scheme

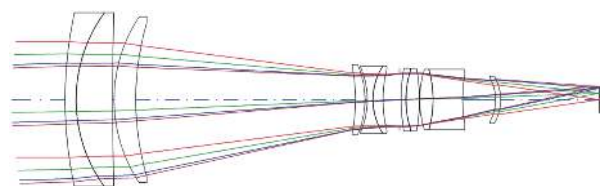


图 2 光阑位置固定方案焦距 126 mm 光学系统图

Fig.2 Diagram of 126 mm focal length optical system with fixed stop position scheme

表 3 光阑位置固定方案光学系统具体参数

Tab.3 Specific parameters of optical system with fixed stop position scheme

Parameters	Short focal length	Long focal length
Spectral range/nm	486 - 656	
Effective focal length/mm	32	126
<i>F</i> number	3.5	
Object space angle/(°)	12.96 × 7.22	3.24 × 1.82
Total optical length/mm	170	
Maximal effective aperture/mm	Φ52	
Focal length of zoom group/mm	-42.30	
Zoom stroke/mm	62.60	

为压缩轴向尺寸、径向尺寸及变焦行程,尝试将短焦光阑、长焦光阑设置于不同位置,此时短焦状态和长焦状态的 *F* 数不再相同。为保证光阑设置有效,短焦状态在长焦光阑位置的通光孔径不应大于长焦状态的光阑孔径;同理,长焦状态在短焦光阑位置的通光孔径不应大于短焦状态的光阑孔径。根据相对孔径的定义,将长焦光阑设置于第 1 片透镜前,使得

光学系统的最大通光孔径为长焦焦距与对应的 *F* 数的比值,将短焦光阑设置于其他位置以提升像质和压缩轴向尺寸。除两个光阑位置外,所有透镜的通光孔径选取长焦状态和短焦状态的最大值以保证无拦光。优化过程控制短焦焦距、长焦焦距与光阑位置固定方案一致,得到光学总长为 150 mm,最大通光孔径为 $\Phi 42$ mm,变焦行程为 35.97 mm 的双视场可见光镜头,图 3、图 4 分别为焦距 32 mm、焦距 126 mm 光学系统图,表 4 为具体参数。焦距 32 mm 对应的水平视场角 13.18°,焦距 126 mm 对应的水平视场角 3.28°,满足指标要求。

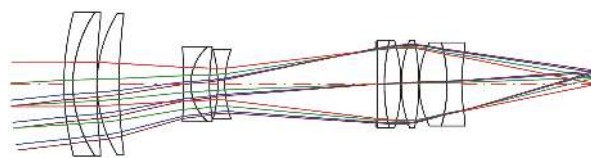


图 3 光阑位置切换方案焦距 32 mm 光学系统图

Fig.3 Diagram of 32 mm focal length optical system with switchable stop position scheme

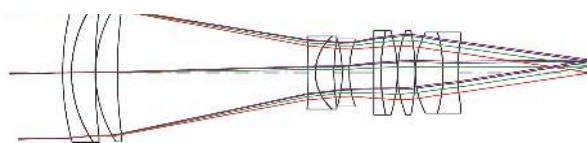


图 4 光阑位置切换方案焦距 126 mm 光学系统图

Fig.4 Diagram of 126 mm focal length optical system with switchable stop position scheme

表 4 光阑位置切换方案光学系统具体参数

Tab.4 Specific parameters of optical system with switchable stop position scheme

Parameters	Short focal length	Long focal length
Spectral range/nm	486 - 656	
Effective focal length/mm	32	126
<i>F</i> number	2.3	3
Object space angle/(°)	13.18 × 7.30	3.28 × 1.84
Total optical length/mm	150	
Maximal effective aperture/mm	Φ42	
Focal length of zoom group/mm	-24.29	
Zoom stroke/mm	35.97	

与常规的光阑位置固定方案对比,光阑位置切换方案实现光学总长 12%、最大通光孔径 19%、变焦行程 43% 的压缩和相对孔径 34%、14% 的提升。

光阑位置切换方案选用的材料为：H-ZLaF4LA、H-ZPK1A、H-ZPK5、H-ZLaF53B、H-ZLaF90、H-ZF7LA、H-FK61 和 H-LaK52。第 1~3 片透镜构成前固定组，整体具有正光焦度；第 4~6 片透镜构成变焦组，整体具有负光焦度，通过其轴向位置切换实现短焦状态和长焦状态的切换；第 7~11 片透镜构成后固定组，整体具有正光焦度，选用 P 值相近而 ν 值不等的 H-FK61 和 H-LaK52 胶合实现复消色差。短焦光阑位于第 7 片透镜前，长焦光阑位于第 1 片透镜前。光阑位置切换方案可与光阑位置固定方案采用相同的机械切换方式，即电机驱动丝杠，带动变焦组轴向移动实现焦距切换，光电编码器记录位置。

2.2 光学系统像质分析

MTF 是目前公认的最能充分反映光学系统实际成像质量的评价指标^[5]，以下对比光阑位置固定方案和光阑位置切换方案的 MTF 曲线，并选取 $\frac{1}{2a} \approx 135 \text{ cycles/mm}$ 作为特征频率。

图 5、图 6 分别为光阑位置固定方案焦距 32 mm、焦距 126 mm MTF 曲线，最上方虚线表示衍射极限。从图中可以看出，为保证焦距 126 mm 各视场 MTF 均大于 0.45，焦距 32 mm 子午方向边缘视场 MTF 已经降至 0.3 以下。图 7、图 8 分别为光阑位置切换方案焦距 32 mm、焦距 126 mm MTF 曲线。从图中可以看出，除子午方向边缘视场外，各视场 MTF 曲线均较为平滑，且全视场 MTF 均大于 0.45，像质良好。

与光阑位置固定方案相比，光阑位置切换方案不仅可以实现结构紧凑，变焦行程更短，相对孔径更大，综合像质也能够明显提升，故最终选用光阑位置切换方案。以下分析光阑位置切换方案的畸变曲线和点列图。

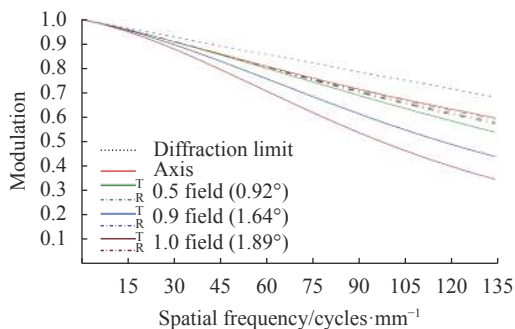


图 5 光阑位置固定方案焦距 32 mm MTF 曲线

Fig.5 MTF curves of 32 mm focal length with fixed stop position scheme

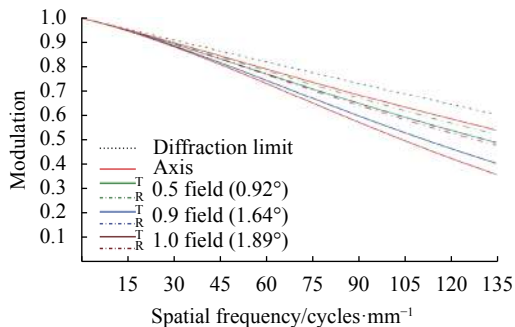


图 6 光阑位置固定焦距 126 mm MTF 曲线

Fig.6 MTF curves of 126 mm focal length with fixed stop position scheme

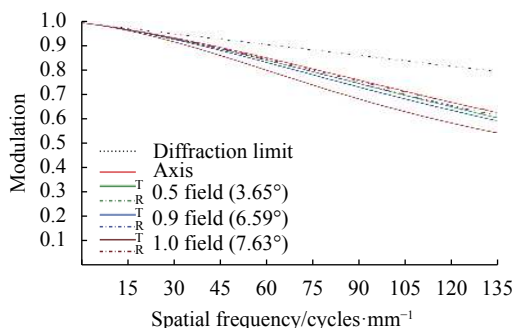


图 7 光阑位置切换方案焦距 32 mm MTF 曲线

Fig.7 MTF curves of 32 mm focal length with switchable stop position scheme

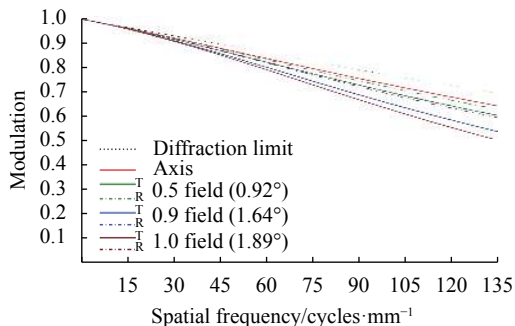


图 8 光阑位置切换方案焦距 126 mm MTF 曲线

Fig.8 MTF curves of 126 mm focal length with switchable stop position scheme

图 9、图 10 分别为光学系统焦距 32 mm、焦距 126 mm 畸变曲线。从图中可以看出，焦距 32 mm 边缘视场畸变最大，约为 -3.4%，焦距 126 mm 边缘视场畸变最大，约为 -0.26%，满足指标要求。

图 11、图 12 分别为光学系统焦距 32 mm、焦距 126 mm 点列图。从图中可以看出，焦距 32 mm 边缘视场点列图的 RMS 直径为 $3.85 \mu\text{m}$ ，焦距 126 mm 边

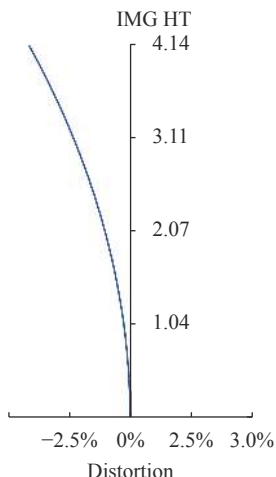


图 9 焦距 32 mm 畸变曲线

Fig.9 Distortion curve of 32 mm focal length

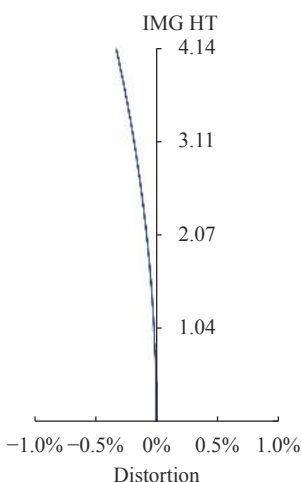


图 10 焦距 126 mm 畸变曲线

Fig.10 Distortion curve of 126 mm focal length

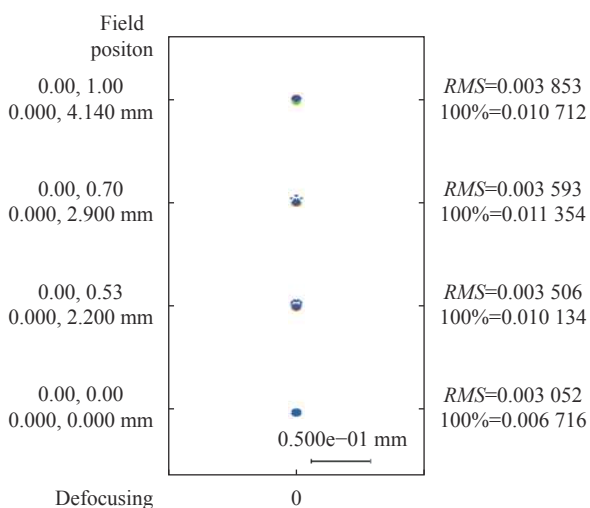


图 11 焦距 32 mm 点列图

Fig.11 Spot diagrams of 32 mm focal length

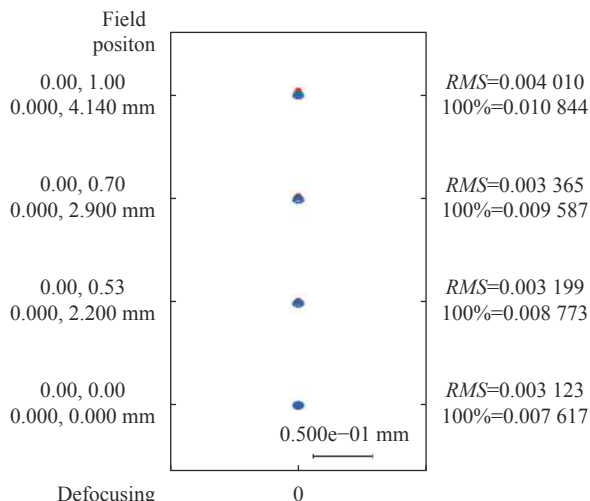


图 12 焦距 126 mm 点列图

Fig.12 Spot diagrams of 126 mm focal length

边缘视场点列图的 RMS 直径为 $4.01 \mu\text{m}$, 略大于相机像元尺寸。其余视场点列图的 RMS 直径均小于相机像元尺寸, 整体像质良好。图中 100% 表示光线追迹所得实际光斑尺寸。

2.3 光学系统公差分析

光学系统中材料的特性误差、元件的加工和装配误差会导致性能下降。该设计中, 按照目前国内工艺水平拟定初始公差范围, 设置变焦组和像面的轴向移动作为补偿器。选用复色 MTF 作为评价指标, 利用反转灵敏度分析生成具体公差, 要求在 135 cycles/mm 处全视场 MTF 大于 0.3 的概率达到 90% 以上。表 5、表 6、表 7 所示为材料公差、加工公差、装调公差, 公差分析曲线如图 13、图 14 所示, 满足设计要求。

表 5 材料公差

Tab.5 Material tolerances

Items	Value
Refractive index/mm	1×10^{-4} - 5×10^{-4}
Abbe-number	0.3%-0.5%
Homogeneity/mm	2×10^{-6} - 5×10^{-6}

表 6 加工公差 ($\lambda=546.1 \text{ nm}$)

Tab.6 Manufacturing tolerances($\lambda=546.1 \text{ nm}$)

Items	Value
Fringe power/ λ	1-2
Surface irregularity/ λ	0.2-0.5
Central thickness/mm	0.02-0.05
Wedge/mm	0.005-0.01

表 7 装调公差

Tab.7 Alignment tolerances

Items	Value
Airspace/mm	0.02-0.05
Tilt/rad	0.0005-0.001
Decenter & Roll/mm	0.02-0.05

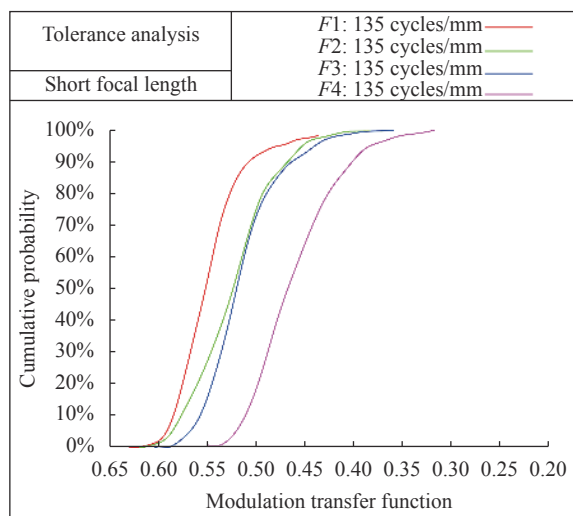


图 13 短焦公差分析曲线

Fig.13 Curves of tolerance analysis at short focal length

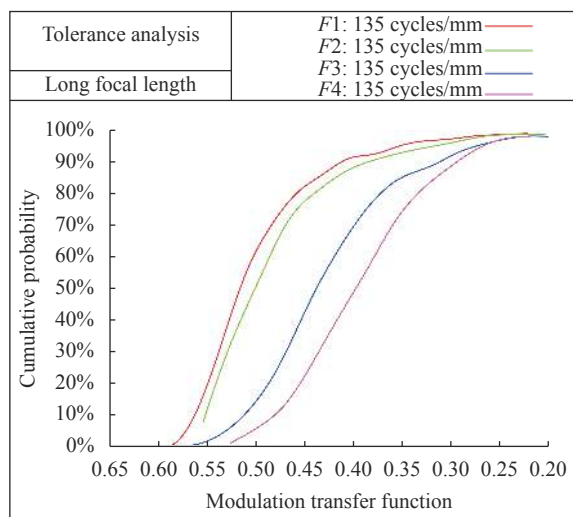


图 14 长焦公差分析曲线

Fig.14 Curves of tolerance analysis at long focal length

3 结论

采用光阑位置切换方案,针对 1080P 高清相机,考虑低照度环境的正常使用,设计了一套光学总长为 150 mm,最大通光孔径为 $\Phi 42$ mm,变焦行程为

35.97 mm,短焦距为 32 mm,对应 F 数为 2.3,长焦距为 126 mm,对应 F 数为 3 的双视场可见光镜头。与常规的光阑位置固定方案相比,光阑位置切换方案能够实现轴向尺寸 12%、最大通光孔径 19%、变焦行程 43% 的有效压缩和相对孔径 34%、14% 的提升;在特征频率 135 cycles/mm 处,全视场 MTF 均在 0.45 以上,明显优于光阑位置固定方案。公差分析结果表明,在 135 cycles/mm 处,全视场 MTF 大于 0.3 的概率达到 90% 以上。光阑位置切换方案为匹配高清相机、大相对孔径的双视场镜头的紧凑化设计提供了新思路。

参考文献:

- [1] Fan Zheyuan, Cao Jianzhong, Qu Enshi, et al. Design of an 8 times ratio visible zoom optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(1): 101-104. (in Chinese)
- [2] Tian Haixia, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong. Design for visible video zoom optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(9): 1797-1799. (in Chinese)
- [3] Qu Rui, Mei Chao, Yang Hongtao, et al. Design of compact high zoom ratio infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1104002. (in Chinese)
- [4] Yuan Xucang. Optical Design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. (in Chinese)
- [5] Li Lin. Modern Optical Design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. (in Chinese)
- [6] Fei Xinlin, Fu Yuegang, Liu Zhiying, et al. Optical design of dual field-of-view imaging spectrometer with filters [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(6): 943-946. (in Chinese)
- [7] Bai Yu, Xing Tingwen, Jiang Yadong, et al. Design of infrared dual of view optical system with long focal length and high resolution [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2589-2594. (in Chinese)
- [8] Daniel Kopp, Tamara Brender, Hans Zappe. All-liquid dual-lens optofluidic zoom system [J]. *Applied Optics*, 2017, 56: 3758-3763.
- [9] Sun-Hyung Jo, Sung-Chan Park. Design and analysis of an 8 \times four-group zoom system using focus tunable lenses [J]. *Optics Express*, 2018, 26: 13370-13382.
- [10] Song Yanfeng, Sun Weiping, Wang Guoli. One kind of high resolution TV guided optical zoom system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(2): 203-208. (in Chinese)

- [11] Bai Hubing, Miao Li. Design of large aperture and long focal length zoom optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(5): 644-649. (in Chinese)
- [12] Bai Tingzhu. Principle and Technology of Photoelectric Imaging[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. (in Chinese)
- [13] Li Lin. Applied Optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010. (in Chinese)
- [14] Shi Xueshun, Liu Hongyuan. Discussion on the test method of the working distance for imaging tracking system [J]. *Science & Technology Information*, 2009, 29: 807, 845. (in Chinese)
- [15] Zhao Bailin, Zhang Pengfei, Gao Guoming. Characteristics of aerosol optical thickness in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1986, 44(2): 235-241. (in Chinese)
- [16] Li Shixian, Li Lin. Handbook of Optical Design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press. (in Chinese)
- [17] Wang Zhijiang. Handbook of Practical Optical Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese)