

超大视场红外光学镜头设计

陈建发, 潘枝峰, 王合龙

(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 超大视场红外光学镜头在军事上主要用于对来袭目标进行告警, 相比于常规红外光学系统, 其设计具有许多不同的特点。结合实际工程应用, 在投影方式、光学构型、像面照度、视场、无热化、评价方式等方面对超大视场红外光学系统设计的特点进行分析。给出了一个具体的设计实例, 所用探测器采用 $1\ 024 \times 1\ 024 @ 15\ \mu\text{m}$ 制冷型中波红外探测器, 光学系统工作波段 $3.7 \sim 4.95\ \mu\text{m}$, 焦距 $9.6\ \text{mm}$, 视场 116° , 仅采用 4 片透镜实现无热化设计, 不含衍射面, 工作温度覆盖范围 $-55 \sim +70\ ^\circ\text{C}$, 镜头结构紧凑, 总长度小于 $70\ \text{mm}$ 。像质评价结果表明: 全视场单个像元角分辨率均匀性 95% 以上, 单个像元能量集中度在 75% 以上, 光学系统边缘视场照度为中心视场照度的 90% 以上。

关键词: 光学设计; 超大视场; 视场拼接

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20190443

Design of infrared optical lens with large field of view

Chen Jianfa, Pan Zhifeng, Wang Helong

(Luoyang Institute of Electro-optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: The ultra large field of view infrared optical lens was mainly used to warn the incoming target militarily. Compared with the conventional infrared optical system, its design had many different characteristics. Combined with practical engineering applications, the characteristics of the design of the infrared field system of the large field of view were analyzed in terms of projection mode, optical configuration, image plane illumination, field of view, non-thermalization, evaluation mode and so on. A concrete design example was given. The detector adopted $1\ 024 \times 1\ 024 @ 15\ \mu\text{m}$ cooled medium wave infrared detector. The operating band of the optical system was $3.7\text{--}4.95\ \mu\text{m}$, the focal length was $9.6\ \text{mm}$, the field of view was 116° , and only 4 lenses were used to realize optical non-thermalization without diffraction surfaces, the working temperature covered a range of $-55\text{--}70\ ^\circ\text{C}$, the lens structure was compact, and the total length was less than $70\ \text{mm}$. The results of image quality evaluation showed that the angular resolution uniformity of a single pixel in the full field of view was more than 95%, the energy concentration of a single pixel was more than 75%, and the illuminance of the optical system edge field of view was more than 90% of the central field of view.

Key words: optical design; large field of view; field of splicing

收稿日期: 2020-02-10; 修订日期: 2020-03-25

作者简介: 陈建发 (1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事红外光学系统设计方面的研究。Email: biterika@qq.com

0 引言

超大视场红外光学镜头,在军事上主要用于对来袭导弹或红外威胁目标进行告警指示,可在武器装备平台上(如机载、车载、舰载等平台)同时布局多个镜头实现周视 360°告警,具备全向态势感知功能,是一种重要的军用光电产品^[1]。

超大视场红外光学镜头同时具有广角镜头和红外光学镜头的一些特点,但同时又有别于普通红外光学镜头,具体来说有以下几个方面^[2-3]:(1)存在很大的负畸变。当光学系统视场角超过 60°时,采用理想成像方式时,像高会随着视场角增大而急剧增加,对于像面尺寸有限的探测器来说,需引入大量负畸变,以获得足够的视场;(2)具有很大的负渐晕。系统的像面照度与入射光线角度余弦的四次方成正比,由于光学系统视场较大,如半视场角 65°时,边缘照度仅有中心照度的 40%左右,因此在光学设计中需对边缘视场引入很大的负渐晕,增大光通量,提高照度;(3)无热化的设计需求。与其他军用红外光学镜头一样需满足军事上宽温度范围内(通常典型的温度范围是-55~70℃)的成像质量优良;(4)像质评价侧重要素不同。与常规红外光学镜头相比,超大视场红外光学镜头用于对来袭导弹告警时,主要关注对目标的指示精度和作用距离,这分别体现在单像元角分辨率均匀性和单像元能量会聚度两方面。

近年来,国内外许多学者对超大视场红外光学镜头进行了研究,研究内容主要集中在光学镜头部分。其中光学镜头所用探测器面阵小;光学元件较多;镜头长度较长;光机结构件采用热胀系数小,但密度大、热导率低、可加工性差的钛合金实现;其无热化设计技术手段采用折衍混合实现^[3-6]。文中从需求出发,对超大视场红外光学镜头的设计特点进行分析,并给出了具体的一个设计实例。光学系统所用探测器为 1 024×1 024@15 μm 大面阵中波制冷型红外探测器,仅采用 4 片透镜,不含衍射面,实现光学被动无热化设计,光机结构件材料为铝合金,镜头结构紧凑,总长度小于 69 mm,光学视场达到 116°。

1 设计特点

结合实际工程应用需求,在投影方式、光学构

型、像面照度、视场、无热化、评价方式等方面对超大视场红外光学镜头的设计特点进行分析。

1.1 投影方式

对于无限远物体成像,成像畸变为 0 的理想光学镜头其像高与视场符合以下公式,即:

$$h = f \tan \theta \quad (1)$$

式中: f 为物方焦距; θ 为物方半视场角。

由公式(1)可知,当半视场角较大时,像高会随之急剧增大,因此超大视场光学镜头必须引入一定量的负畸变,才能在有限的像面尺寸上设计出足够的成像视场。

对超大视场镜头的设计,采用“非相似”成像原理,将理想光学镜头所不能成像的物方范围,通过引入负畸变的方式变形压缩来成像。

成像像高与视场通常符合以下投影方式:

$$h = 2f \tan(\theta/2) \quad (2)$$

$$h = 2f \sin(\theta/2) \quad (3)$$

$$h = f \sin \theta \quad (4)$$

$$h = f \theta \quad (5)$$

对公式(2)~(5)两边分别求导,得到角分辨率与视场的关系如下:

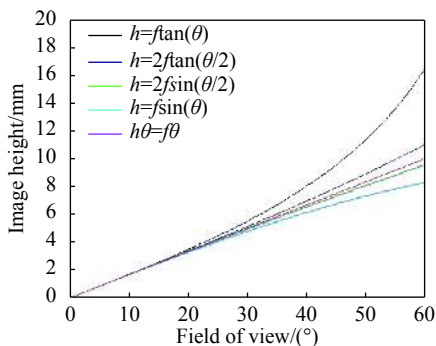
$$dh/d\theta = f / \cos(\theta/2)^2 \quad (6)$$

$$dh/d\theta = f \cos(\theta/2) \quad (7)$$

$$dh/d\theta = f \cos(\theta) \quad (8)$$

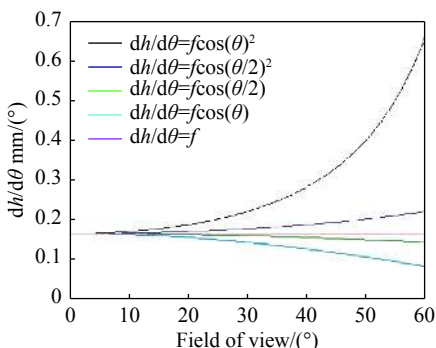
$$dh/d\theta = f \quad (9)$$

不同投影方式对应的像高与视场角的关系如图 1(a)所示,不同投影方式对应的角分辨率与视场角的关系如图 1(b)所示。超大视场红外光学镜头实际使用过程中,红外目标经光学系统成像后通常为点目标,相对于目标的几何特征信息,系统更关心其角位置信息,以便获得较高的角位置指示精度。由图可知, $h = f\theta$ 投影方式,像高与视场角成正比关系,单像元角分辨率不随视场变化,全视场一致性较好。因此军用超大视场红外光学镜头应选用 $h = f\theta$ 投影方式。



(a) 像高与视场角的关系

(a) Relation between image height and field of view angle



(b) 角分辨率和视场角的关系

(b) Relationship between angular resolution and field of view

图 1 不同投影方式的像高及角分辨率与视场角关系

Fig.1 Relationship between the image height and angular resolution with angle of view under different projection modes

1.2 光学构型

超大视场红外光学镜头具有反摄远物镜的特征,其中前组透镜为负光焦度,后组透镜为正光焦度,如图 2(a) 所示。这样的光焦度分布有两个优点:(1) 轴外视场具有一定的负渐晕,能够使斜光束的横截面面积远大于轴向光束的横截面面积,也可称为光阑慧

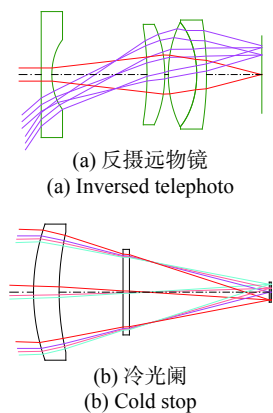


图 2 光学构型

Fig.2 Optical configuration

差,从而加强像面边缘照度,使像面整体照度均匀性较好;(2) 具有很长的镜头长度,从而有利于结构设计和装调。

除此之外,军用红外光学系统一般采用制冷型探测器,相对于非制冷型探测器其具有较高的灵敏度。制冷型探测器具有一个位于探测器前端的光阑(也称为冷光阑),为避免杂散辐射,需保证光学系统的出瞳必须与探测器冷光阑匹配(也即通常说的 100% 冷光阑效率),如图 2(b) 所示。

1.3 像面照度

超大视场红外光学镜头边缘视场和中心视场入射光线的入射角度差别较大,如图 3(a) 所示;对于制冷型探测器,光线最终会聚入射至探测器像面时,边缘视场和中心视场光束的入射角度也有较大差别,如图 3(b) 所示,这两种情况都会导致像面上照度的不均匀性^[7]。

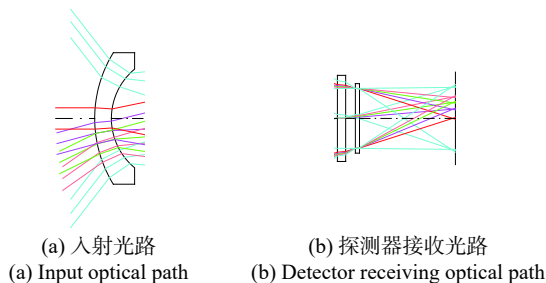


图 3 像面照度影响因素

Fig.3 Influencing factors of image illumination

1.4 无热化方式

目前常用的无热化设计方式有三种,机械被动式、电子主动式、光学被动式。

超大视场红外光学镜头更适合采用学被动无热化的实现方式,分析如下:

(1) 由于作战平台通常对于光学镜头的重量、体积都有严格的限制,结构件尽量考虑轻量化材料,因此一般不考虑采用机械被动式;

(2) 电子主动式无热化技术,通过移动镜片或镜组进行调焦,在调焦过程中会导致光学系统的焦距发生变化,继而视场随之变化,最终影响告警精度;

(3) 光学被动无热化技术是指利用光学材料间不同的热差与色差特性及结构材料的热膨胀特性,通过合理分配光焦度、元件间隔及选择结构材料,使得系

统在要求的温度范围内,其热离焦近似为零。虽然光学被动无热化技术实现较为困难,但无热化效果好,可靠性高。

1.5 视场分析

对于超大视场红外光学镜头,合理的设计视场可显著降低光学设计的难度,对提升成像质量和简化光学系统结构具有重要影响。武器装备平台一般都要布局多个超大视场红外光学镜头,对周视 360°空域进行实时监视,为避免视场拼接盲区,并减少视场重叠率,需合理选择单个光学系统的视场。

图 4 给出了一种视场布局方案,其中单个光学镜头需覆盖的视场区域为 94°×94°,相邻镜头间视场重叠率 4°,通过 6 个光学镜头组合对 4π 球形空间实现全覆盖。

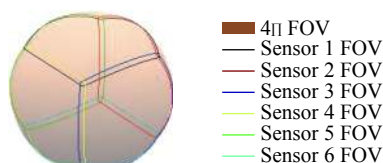


图 4 光学镜头视场布局

Fig.4 Field layout of optical lens

1.6 评价方式

与普通军用红外光学系统一样,超大视场红外光学系统的评价方式应包含光学传递函数(MTF)、点列斑(RMS)、高低温性能(无热化设计)等,除此之外,还对光学系统的角分辨率和能量集中度有特殊要求。

(1) 角分辨率

超大视场红外光学系统实际使用过程中,红外目标经光学系统成像后通常为点目标,相对于目标的几何特征信息,系统更关心其角度位置信息,以便获得较高的告警指示精度,对应光学设计中的性能评价方式体现在系统的畸变以及整个视场范围内的角分辨率均匀性。

(2) 能量集中度

光学设计的一般情况是轴上视场的性能通常比边缘视场的要好一些,这在 MTF 上可以很好的反映出来,例如某中波红外镜头,其 F 数为 2,焦距 50 mm,视场 6°,在 33 lp/mm 处,实测 MTF 轴上视场 0.6,边缘视场 0.4,这表明在该空间频率(通常为探测器象元大小决定的特征频率)时,全视场范围内对目标几何特

征的解析度均较好,其轴上视场对目标的解析度优于边缘视场。而对于超大视场红外光学系统,实际使用过程中,其目标经光学系统成像后多为点目标(或很小的面目标),目标的几何特征的细节分辨显得并不重要,系统更关心的是目标在多远距离可被探测到,通常并不允许目标在边缘视场和轴上视场时探测距离发生较大差别。这体现在光学设计的评价方式是单个像元的能量集中度,光学设计中要兼顾轴上和边缘视场能量集中度的一致性。

2 设计实例

下面给出具体的设计实例,具体要求如下:

1. 视场布局要求

- (1) 视场拼接范围: 4π 球形空域
- (2) 光学镜头数量: 6 个
- (3) 单个光学镜头视场一致
- (4) 相邻镜头视场重叠率不小于 4°

2. 探测器

- (1) 像元数: 1 024×1 024
- (2) 像元尺寸: 15 μm
- (3) F 数: 2

3. 光学设计要求

- (1) 波段: 3.7 ~ 4.95 μm
- (2) 边缘视场照度 ≥ 90%
- (3) IFOV 非均匀性 ≤ ±5%
- (4) MTF: ≥ 0.4(@33 lp/mm)
- (5) 能量会聚度: ≥ 60%(15 μm)
- (6) 无热化温度范围: -55 ~ 70 °C
- (7) 镜头长度: ≤ 70 mm

依据视场要求,通过数值迭代计算可得到光学系统的最小设计视场为 116°,此时每个光学镜头在探测器像面上的有效成像视场如图 5 所示,经计算视场重叠率最小为 4°,最大为 12.7°,探测器像素数利用率 96.5%。

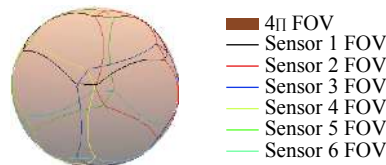


图 5 光学镜头实际成像视场布局方案

Fig.5 View layout plan of optical lens actual imaging field

红外探测器为制冷型,为实现 100% 冷光阑效率、超大视场,光学系统应采用图 3 所述光学构型;为保证全视场内各像素的角分辨率非均匀性 $\leq\pm 5\%$,采用 $h=f\theta$ 投影方式;利用光阑彗差在轴外引入大量负渐晕,提高视场边缘的照度;为了满足光学系统在 $-55\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内像质优良,采用光学被动无热化设计方案。最终优化后的光路图如图 6 所示,系统仅采用四块透镜实现无热化设计,不含衍射面;结构紧凑,镜头总长度 69 mm;其中光机结构件从可加工性、轻量化、环境适应性方面考虑,选择铝合金 7075,其热膨胀系数为 $23.6\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

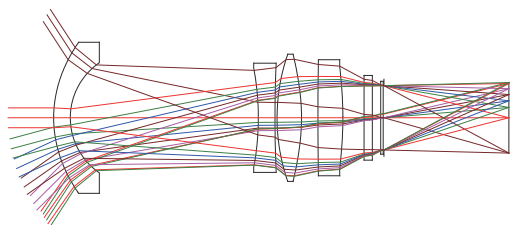


图 6 光学系统图

Fig.6 Optical system diagram

通过引入大量负渐晕提高边缘视场的照度^[8],最终优化结果如图 7 所示,其中边缘视场照度为中心视场照度的 90.3%,满足设计要求。

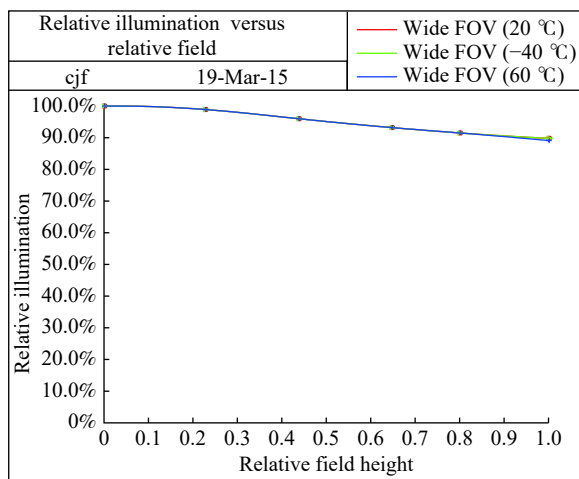


图 7 各视场照度图

Fig.7 Illumination diagram of each field of view

光学系统 20、-55、70 °C 的单像元 (15 μm) 能量会聚度如图 8 所示,由图可知,在 $-55\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,全视场单个像元的能量会聚度均大于 75%。

光学系统畸变及角分辨率分析如图 9 所示,红色

曲线为 $f-\theta$ 畸变曲线,绿色曲线为角分辨率曲线。由图可知,全视场内 ($\pm 58^{\circ}$) 各像素的角分辨率最大偏差 2.5%。

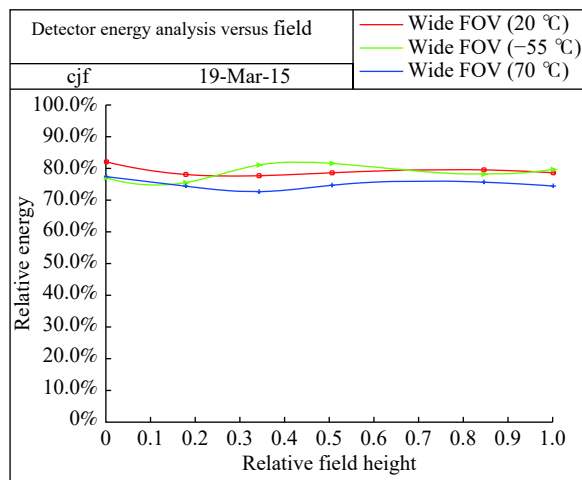


图 8 各视场单像元能量会聚度图

Fig.8 Detector energy diagram of each field of view

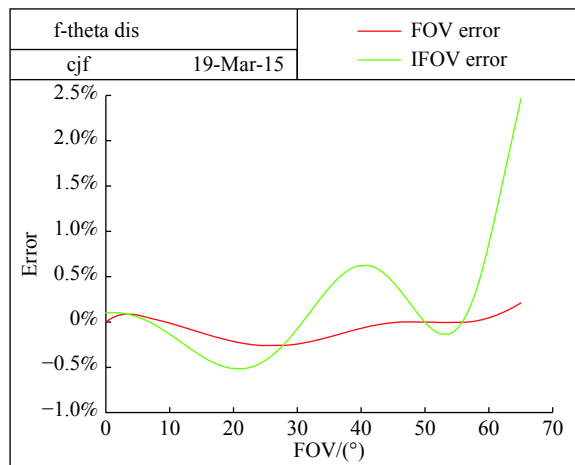
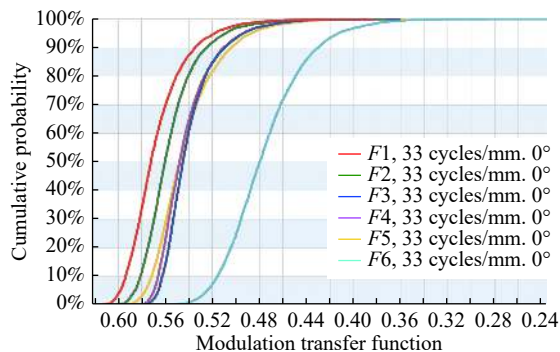


图 9 各视场畸变及角分辨率分布图

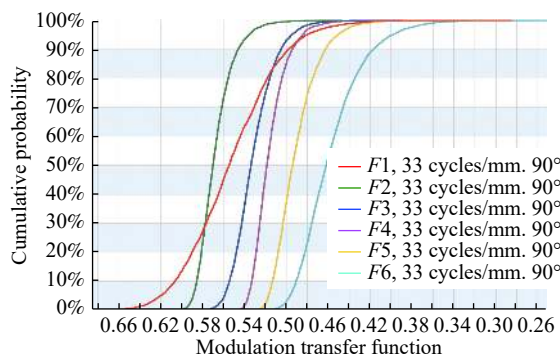
Fig.9 Distortion and angular resolution of each field of view

在光学设计软件 CODEV 中,采用默认公差设置分析,结果如图 10 所示。由图可知,各视场公差一致性较好,在 33 cycles/mm 空间对线处,有 97.7% 的概率,弧矢方向全视场 MTF 优于 0.42,子午方向全视场 MTF 优于 0.4。依据经验,满足使用要求。

在杂光仿真软件 Tracepro 中,建立冷反射逆光路仿真模型,如图 11(a) 所示,图 11(b) 给出了像面逆光路仿直接收到的照度分布;图 11(c) 给出了像面工作波段等效温差分布。通常系统 NETD 在 25 mK 左右,



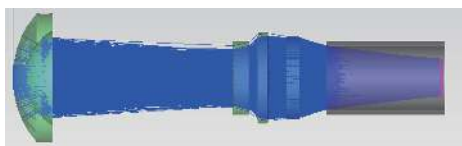
(a) 弧矢方向
(a) Sagittal direction



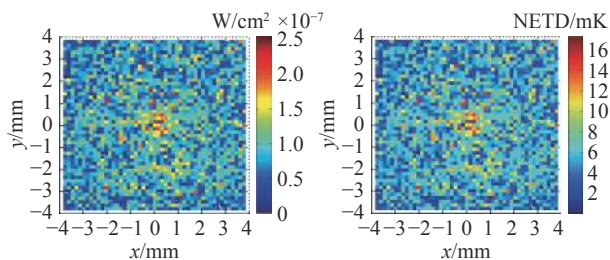
(b) 子午方向
(b) Tangential direction

图 10 公差分析

Fig.10 Tolerance analysis



(a) 冷反射分析模型
(a) Narcissus analysis modeling



(b) 照度分布
(b) Illumination distribution
(c) 噪声等效温差分布
(c) NETD distribution

图 11 冷反射分析建模及仿真结果

Fig.11 Modeling and simulation results of narcissus analysis

由图可知冷反射等效温差最大值为 17.3 mK, 小于系统 NETD, 冷反射满足使用要求。

3 结 论

超大视场红外光学镜头, 其视场一般在 90°以上, 军事上主要用于对来袭导弹或红外威胁目标进行告警指示作用, 是一种重要的军用光电产品。超大视场红外光学镜头与常规红外光学相比, 具有许多不同的特点, 文中结合实际工程应用, 在投影方式、光学构型、像面照度、视场分析、无热化、评价方式等方面对超大视场红外光学系统的设计特点进行分析, 并给出了具体的设计实例, 对此类光学系统的设计具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Zhang Yuansheng. Development of airborne electro-optical warning system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2015, 22(6): 52-55. (in Chinese)
- [2] Huang Fuyu, Shen Xueju, He Yongqiang, et al. Performance analysis of super-wide field of view imaging system used for space target detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3134-3140. (in Chinese)
- [3] Yang Shengjie. Optical design for high resolution cooled mid-wavelength infrared wide-angle imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0822003. (in Chinese)
- [4] Hirsh I, Shkedy L, Chen D, et al. Hybrid dual-color MWIR detector for airborne missile warning systems[C]// Proceedings of SPIE, 2012, 12: 83530H1-12.
- [5] Tao Zhi, Wang Min, Xiao Weijun, et al. Design for cooled dual-band infrared refractive-diffractive hybrid optical system of athermalization and wide FOV [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(11): 1122004. (in Chinese)
- [6] Oskotsky. Wide angle MWIR F-Theta lens: Russia, 236344A1[P]. 2018.
- [7] Chen Chen, Hu Chunhai, Li Weishan, et al. Calculation method of relative illumination of lens image plane [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1108001. (in Chinese)
- [8] Zhong Xing, Zhang Yuan, Jin Guang. Illumination uniformity optimization of wide-viewing-field optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322004. (in Chinese)