

长波红外鱼眼凝视光学系统设计

张继艳*, 孙丽婷, 秦 腾

(厦门理工学院 光电与通信工程学院, 福建 厦门 361000)

摘要: 提出了一种新型的长波红外鱼眼镜头设计方法, 基于高斯光学和三级像差理论, 在传统的反远距的广角镜头的基础上, 增加一片负弯月型透镜的前组, 使其半视场角由原来的 $\pm 70^\circ$ 增加到 $\pm 100^\circ$ 。采用等距离投影成像方法, 系统 $f-\theta$ 畸变小于 6%, 焦距为 1.97 mm, 相对孔径为 1 : 1, 采用像方远心的成像设计, 边缘视场相对照度达到 80%。为了增大孔径, 消除轴外像差, 采用五片非球面设计, 成像质量接近衍射极限, 全视场的调制传递函数大于 0.37@42 lp/mm, 采用机械被动式的无热化设计方法可以满足较宽的温度范围内系统成像质量稳定。设计结果对长波红外鱼眼光学系统设计具有一定的参考价值。

关键词: 光学设计; 长波红外; $f-\theta$ 畸变; 鱼眼镜头; 超广角

中图分类号: O439; TH74 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220430

Design of long-wave infrared fisheye staring optical system

Zhang Jiyan*, Sun Liting, Qin Teng

(School of Opto-electronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361000, China)

Abstract: A novel design method for long-wave infrared (LWIR) fisheye lens was proposed based on Gaussian optics and the third-order aberration theory. The half field of view (FOV) of traditional inversed telephoto wide-angle lens increased from $\pm 70^\circ$ to $\pm 100^\circ$ by adding a negative meniscus to pre-group. By using the equidistant projection imaging method, the $f-\theta$ distortion of the system was less than 6%. The focal length was 1.97 mm, its relative aperture was 1 : 1, the system was telecentric structure in the image space, and its relative illumination of the marginal FOV achieved 0.8. A five-piece aspheric design was adopted to increase the aperture and remove the off-axis aberrations. The imaging quality is near-diffraction-limited. The modulation transfer function value was above 0.37@42 lp/mm. The imaging quality of the system was stable at a wide range of temperatures with the mechanically passive athermal method. The results have a certain reference for LWIR fisheye optical system design.

Key words: optical design; LWIR; $f-\theta$ distortion; fisheye lens; ultra wide-angle

收稿日期: 2022-06-22; 修订日期: 2022-08-28

基金项目: 国家自然科学基金 (61704142)

作者简介: 张继艳, 女, 讲师, 硕士生导师, 博士, 主要从事信息光学、光学系统设计方面的研究。

0 引言

超大视场的红外凝视成像技术因具有全空域包容、全时域实时的战场感知能力,日益受到重视。比较目前常见的红外凝视光学系统,现有的小视场旋转/扫描系统视场较小,无法做到全时域实时,而折反射全景立体成像技术又存在中心盲区,且其体积较为庞大。红外鱼眼凝视系统可以单机同时监测 $120^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 的视场区域,执行半球区域红外预警,时域漏警率低,结构简单,体积小,质量轻,功耗低,有着广阔的发展前景^[1-4]。

国内外已有多家科研机构对超大视场红外鱼眼镜头展开了深入的研究。国内吴海清等讨论了折射/衍射的红外鱼眼镜头设计方案^[5];付跃刚等对双波段红外鱼眼镜头的无热化设计进行了研究^[6];段其强等设计了折反射的小型紧凑式红外全景镜头^[7]。国外 Simon Thibault 设计并研发了用于全方位态势感知的半球长波红外全景镜头,采用非球面和柱面镜,所设计的透镜结构紧凑^[8]; Guillaume Druart 等对针孔式红外鱼眼镜头进行了研究^[9]。上述文献中系统设计均未有同时具有大孔径且超大视场的长波红外鱼眼光学系统设计。

光电侦查领域对光学镜头的成像灵敏度提出更高要求,系统要具备大的相对孔径及更高的像面照度及分辨率^[10],兼具超大视场和大孔径是长波红外鱼眼凝视光学系统较为重要的目标。

鱼眼镜头中,大视场物点的成像光束以大角度入射到前组负弯月型透镜,光束经过光学系统在子午和弧矢平面内的聚焦位置不一致并且波阵面严重偏离球面,研究轴对称光学系统的赛德尔像差理论不再适用于该类光学系统的设计和像差分析^[11-12]。鱼眼镜头中的光阑像差使得主光线标定存在严重困难,常规反远距镜头计算不适用于此类超大广角系统。大孔径结构设计一般较复杂,大视场角的轴外像差较严重,同时兼备大孔径且超大视场的红外广角镜头的初始结构获取存在困难。

文中提出一种新型的长波红外鱼眼镜头的设计方法,在传统的广角大孔径红外镜头的基础上,通过在前组增加一片负弯月型透镜,将视场角从广角扩大到超广角,基于高斯光学与三级像差理论,对前后组

分别进行计算,得到系统的初始结构。基于该方法,设计了全视场角为 200° 的大孔径的长波红外鱼眼光学系统,相对孔径为 $1:1$,系统结构简单,共由五片透镜组成,采用五个非球面,结构采用像方远心光路设计,满足成像敏感元件光照度的要求,像面均匀性好^[13],成像接收器采用非制冷长波焦平面阵列探测器,工作波段为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$,成像系统的分辨率较高。采用等距离投影的成像方式,设计中控制像高与视场角呈线性关系,为图像的畸变校正带来了方便。采用机械被动式的无热化设计方法可以满足较宽的温度范围内系统成像质量稳定。设计结果对长波红外鱼眼光学系统设计具有一定的参考价值。

1 设计思路

鱼眼透镜从反远距结构演化而来,后截距较长,焦距较短,焦距越短其桶形畸变就越大。由于其视场角较大,采用非相似成像思想,像空间会引入大量的桶形畸变,鱼眼透镜对畸变不加以控制,可以获得覆盖整个半球的视野^[14]。根据不同的研究需要,天文测量、通量校准和亮度测量必须采用准确的畸变投影模型。为了从鱼眼光学系统中获得图像信息,设计采用的是等距离投影的鱼眼图像校正模型^[15]。

有限共轭距系统的焦距和放大率公式为:

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

$$\beta = \frac{l'}{l} \quad (2)$$

公式(1)、(2)的实际成像都是近轴公式,它们的正弦、正切与弧度值都近似相等,轴上主光线的孔径角 u' 和主光线的视场角 ω 都不大,但是超广角物镜的视场显然不符合上述公式,同时其共轭面横向放大率 β 也不再是常数,从而产生了很大的畸变。横向放大率 β 随着视场角 ω 的增大呈现非线性,大视场角下的入射光瞳偏移,近轴近似的公式不再成立^[3]。

鱼眼镜头物方近轴的主光线入射角和轴外视场的主光线入射角的不对称会产生光阑彗差,焦距也同样随着视场角的增加而变化,孔径光阑会发生倾斜,光瞳倾斜以压缩瞳孔为代价,也进而改变了光瞳的光通量。

红外鱼眼镜头如半视场角超过 90° ,则传统的光

线追迹中迭代逼近的算法就会出现错误, 因其迭代起点离真实的入瞳中心较远, 会出现“主光线”在折射面上全反射或与折射面无交点, 从而使计算中断^[16-17]。所提出的方法是基于传统反远距广角镜头的基础上, 在前组增加一片负光焦度的弯月型透镜, 使其半视场角增加到90°以上。通过相关公式推导, 由总的光焦度、后组焦距及后组的后截距反推前组的焦距及前组和后组的间距 d_1 , 从而获得前后组的相对孔径, 得到系统的初始结构。

1.1 光学系统设计

光学系统由传统的长波红外广角镜头与附加的弯月型透镜构成。传统的红外广角镜头的半视场角通常为 $40^\circ \leq \omega \leq 70^\circ$ 。为了减小前组的负担, 使系统半视场角增加到90°以上, 后组选取半视场角为70°的长波红外广角物镜。图1为半视场角为70°的传统长波红外广角镜头的光路图, 由四片透镜组成, 均为高折射率低色散的锗(Ge)红外材料。系统为反远距结构, 其前组具有负光焦度, 透镜组的后工作距大于其焦距。该系统为像方远心光路设计, 孔径光阑位于后组的物方焦平面上, 像面与后组的后焦面重合, 其像方主光线与光轴平行, 出瞳位于像方无穷远, 该红外广角物镜具有较大的孔径值。

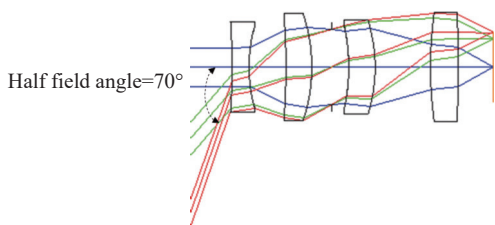


图1 传统长波红外广角镜头

Fig.1 Traditional LWIR wide-field lens

在传统的长波红外广角镜头前增加一片负光焦度的弯月型透镜, 系统被分成两个透镜组, 第一透镜组为第一表面到第二表面, 第二透镜组为第三表面到第十一表面, 如图2所示的鱼眼光学系统中, 负的弯月型透镜可以将半视场角增加到100°, 后组的四片透镜将补偿由于物距的变化所引起的像平面的变化, 由于是内聚型透镜, 并不会改变图1传统广角物镜所示的透镜总长度。图2同样给出用于近轴设计的鱼眼透镜的光学结构, 像面上的近轴光线和鱼眼透镜系统焦距之间的关系如公式(3)、(4)所示^[18]:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d_1\varphi_1\varphi_2 \quad (3)$$

$$d_1\varphi_1 = 1 - d_2\varphi \quad (4)$$

式中: φ_1, φ_2 分别为第一透镜组和第二透镜组的光焦度; d_1 为第一透镜组的第二主平面 H_1' 到第二透镜组的第一主平面 H_2 之间的距离; d_2 为第二透镜组的第二主平面 H_2' 到像平面之间的距离; φ 为鱼眼透镜总的光焦度, 系统焦距的倒数。在近轴系统中, 由于向传统广角系统中添加一个附加透镜, 则 φ_2 和 d_2 是已知的。为了便于推导, 取归一化条件, 假设 $\varphi = 1$, 则由公式(3)、(4)可以得出:

$$f_1' = \frac{f'}{1 - d_2\varphi_2} = \frac{f'}{1 - \frac{d_2}{f_2'}} \quad (5)$$

$$d_1 = \left(1 - \frac{d_2}{f_2'}\right) f_1' = \frac{f' \left(1 - \frac{d_2}{f_2'}\right)}{1 - \frac{d_2}{f_2'}} \quad (6)$$

式中: f_1', f_2', f' 分别为第一透镜组的焦距和第二透镜组焦距及系统总焦距, 通过公式(5)可以确定第一透镜组焦距 f_1' , 如仍然选择Ge为透镜材料, 可以确定第一片附加弯月形透镜的结构参数, 因其折射率高, 故两表面曲率较小, 可以减小大角度入射光线像差, 特别是高级像差。Ge在8~12 μm波段色散较低, 有利于对色差进行校正。

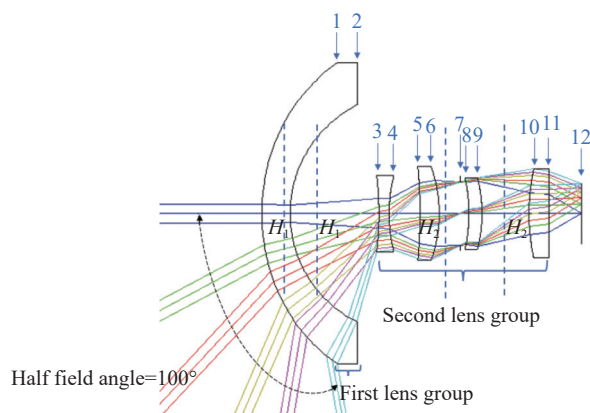


图2 系统近轴光路图

Fig.2 Paraxial optical path diagram of the system

由公式(6)可得到系统前后组之间的距离 d_1 , 鱼眼透镜设计中, 如增大前组和后组之间的间隔 d_1 , 则前后组所负担的入射偏角会减小, 此时光学筒长和前

组的横向尺寸会增大;反之,如果减小 d_1 ,则前后组所负担的入射偏角会增大,镜头的整体尺寸将随之减小,因此合理选择 d_1 值很重要。此时反远距物镜的光阑位于后组及其附近,对弯月形透镜进行整体弯曲,使彗差、畸变、倍率色差处于较小的状态,剩余像差由后组进行补偿。

图 3 为附加的前组负弯月形透镜的主光线示意图,其中 α_1 、 α_2 分别为边缘视场主光线在第一、二表面的入射角, β_1 、 β_2 分别为边缘视场主光线入射到第一、二表面的折射角, r_1 、 r_2 为前组负弯月型透镜前后表面的曲率半径, ω_0 、 ω_1 、 ω_2 分别为入射的物方视场角、第一表面及第二表面的主光线像方视场角, θ 为第二表面出射光线的法线和光轴的夹角, h_1 、 h_2 分别为边缘视场主光线在透镜前后表面的光线投射高度。由前述已知,后组的物方视场角即为前组负弯月形透镜的第二表面像方视场角 ω_2 ,设计要求的物方视场角 ω_0 为已知,故可求视场角的压缩比 ω_0/ω_2 ^[11]:

$$\sin \theta = k = \frac{h_2}{r_2} \quad (7)$$

k 一般取 0.75~0.95,则可得到下述关系,前述弯月形透镜的材料 Ge 为已知:

$$\begin{cases} \sin \beta_2 = \sin(\theta - \omega_2) \\ \sin \alpha_2 = \sin \beta_2 / n \\ \omega_1 = \omega_2 + \beta_2 - \alpha_2 \\ \beta_1 - \alpha_1 = \omega_0 - \omega_1 \\ \sin \alpha_1 = n \sin \beta_1 \end{cases} \quad (8)$$

一般前组弯月形透镜的厚度均远小于其曲率半径,所以暂不考虑透镜的厚度,前组附加透镜前后表面的曲率半径满足如下关系:

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{\sin \omega_1 - \sin \beta_1}{\sin \alpha_2 + \sin \omega_1} \quad (9)$$

由于 φ_1 已知,且满足:

$$\varphi_1 = (n - 1)(c_1 - c_2) \quad (10)$$

式中: c_1 、 c_2 分别为第一表面和第二面的曲率。由公式(7)~(10)即可确定满足视场角压缩比的前后表面的曲率半径 r_1 、 r_2 :

$$h_1 = r_1 \sin(\omega_0 - \alpha_1) \quad (11)$$

由公式(11),第一表面上的边缘视场主光线入射高度 h_1 也随之确定, h_1 即为系统第一表面半孔径。负弯月形透镜的初始结构确定后,系统的初始结构就随之确定,如求解结果不合理,可以对相关参数 k 值等进

行修正。

增加了前组弯月形透镜后,组合系统的半视场角增大到了 100° ,为了提高其光学分辨率及调制传递函数(MTF),需要用三级像差理论对组合系统进行优化。设计中使用了非球面来增加设计的自由度,有利于进一步消除轴外像差,也为设计 $f-\theta$ 畸变提供了更多的自由度。

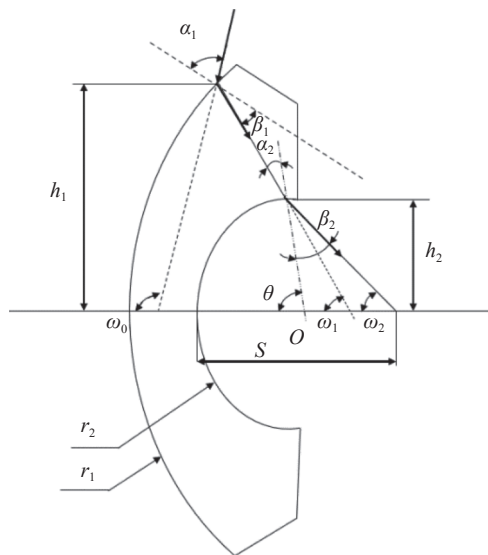


图 3 负弯月形透镜主光线示意图

Fig.3 Optical scheme of a chief ray passing the negative meniscus lens

光学系统中第一、四、六、九、十一面设置为偶次非球面,可由公式(12)、(13)表示:

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + A_4r^4 + A_6r^6 + A_8r^8 + A_{10}r^{10} + \dots \quad (12)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (13)$$

式中:参数 z 为非球面沿 z 轴方向的球面矢高; c 表示球面曲率; k 代表圆锥系数; A_4 、 A_6 、 A_8 、 A_{10} 分别代表四级、六级、八级、十级的非球面系数; r 为光学表面的径向坐标。

1.2 像面照度的均匀性

对于鱼眼透镜而言,由成像照度公式(14),轴外像点的相对照度随 $\cos^4 \omega'$ 下降:

$$E' = E_0 \cos^4 \omega' \quad (14)$$

式中: E_0 表示中心视场的像面照度; E' 表示轴外视场的像面照度; ω' 为像方半视场角。

轴外斜光束截面与轴上光束截面比为渐晕系数

k , 则 $E' = kE_0 \cos^4 \omega'$, 如果 $\omega' \geq 60$, 则边缘视场的照度不足中心视场照度的 6.5%, 光线在探测器上的入射角直接影响探测器的相对响应值, 边缘视场能量及光线在探测器上的入射角问题在该系统中尤为重要, 如入射角过大, 将使红外凝视系统的传感器无法正常工作。像方远心光路的设计减小了轴外主光线在像面上的入射角度, 提高了边缘视场的光照度。同时, 光阑彗差的存在使得近轴入瞳边缘光线的直径小于入瞳的直径, 此时渐晕系数大于 1, 轴外点近轴入瞳的光束宽度必定要大于轴上物点的光束宽度, 从而部分地抵消了 $\cos^4 \omega'$ 的影响, 提高了轴外像点的照度, 增大了像面相对照度。

系统中第一片负光焦度的透镜极大地减小了边缘视场的主光线与光轴的夹角, 减轻了后组视场角的压力, 有利于校正轴外像差。系统为像方远心的结构, 各视场主光线平行于主光轴出射, 大量的负畸变进一步减小像方视场角, 有效地提高了像面照度的均匀性。系统的相对孔径较大且轴外入射角较大, 使得系统第一片透镜的边缘视场入射光线位置较高, 整个系统的横向尺寸会偏大, 设计中需要在外形尺寸、相对照度与视场角几个因素之间进行折中。

2 设计结果及分析

2.1 设计参数

成像接收器选用长波非制冷红外焦平面阵列探测器, 其像元尺寸为 $12 \mu\text{m}$ 、像元数量为 640×512 。鱼眼光学系统成像比较特殊, 其成像面通常为圆形, 小于芯片的垂直方向的尺寸, 成像圆内切于感光芯片, 如图 4 所示, 此次镜头设计的奈奎斯特 (Nyquist) 频率为 $1000 / (2 \times a) = 42 \text{ lp/mm}$, 其中 a 为像元尺寸。

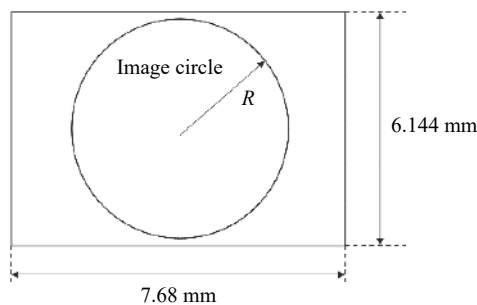


图 4 成像传感器及像面

Fig.4 Image sensor and image plane

长波红外鱼眼光学系统设计参数如表 1 所示, 经设计优化后的镜头结构参数如表 2 所示。

表 1 系统设计参数

Tab.1 Parameters of the system

Parameter	Value
Wavelength band/ μm	8-12
Effective focal length/mm	1.97
Relative aperture	1 : 1
Image surface size/mm	6.1
Field of view/ $^\circ$	± 100

表 2 镜头结构参数

Tab.2 Structure parameters of the lens

Lens	Radius/mm	Thickness/mm	Glass type	Diameter/mm
1 (Aspheric)	21.085	2.856	Ge	15.461
2	12.583	8.950		11.148
3	-36.081	1.050	Ge	3.949
4 (Aspheric)	21.848	3.112		3.708
5	-49.954	1.935	Ge	4.598
6 (Aspheric)	-14.386	2.134		4.805
stop	Infinity	0.852		3.228
8	-17.884	1.335	Ge	3.406
9 (Aspheric)	-13.896	4.733		3.677
10	21.847	2.00	Ge	4.562
11 (Aspheric)	696.584	3.345		4.372
IMA	Infinity			3.058

2.2 像质评价

根据设计参数要求, 基于三级像差理论对系统进行像差的平衡和优化。设计系统前组焦距为 -14.74 mm , 后组焦距为 3.43 mm , 系统视场角为 $\pm 100^\circ$, 后工作距离为 3.35 mm , 总长为 32.3 mm , 系统第一片透镜全孔径为 30 mm , 系统相对孔径为 $1 : 1$ 。图 5 为系统成像的点列图, 系统中心视场、0.7 视场、全视场成像光斑的均方根半径 (RMS) 分别为 1.475 、 2.221 、 $2.695 \mu\text{m}$, 小于像元的大小 $12 \mu\text{m}$, 成像质量完善。图 6 为系统的 MTF, 系统在 Nyquist 频率 42 lp/mm 处, MTF 大于 0.37 , 在 0.7 倍的 Nyquist 频率 30 lp/mm 处, MTF 值大于 0.5 , 成像接近衍射极限。图 7 为系统的相对照度图, 边缘视场的成像照度是中心视场的 0.8 倍, 满足探测器成像灵敏度的要求。由光线追迹数据, 全视场主

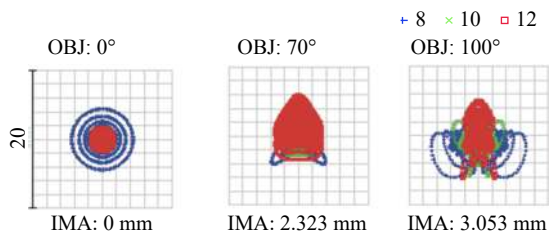


图 5 点列图

Fig.5 Spot diagram

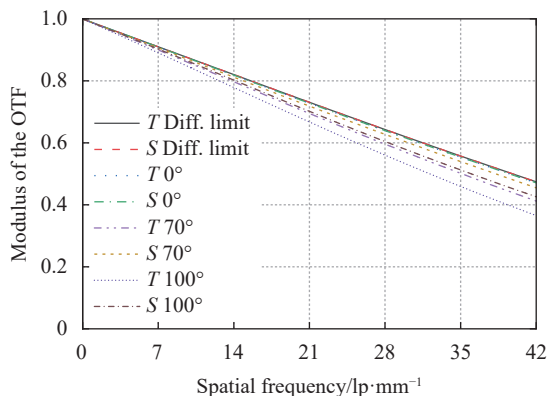


图 6 调制传递函数

Fig.6 MTF

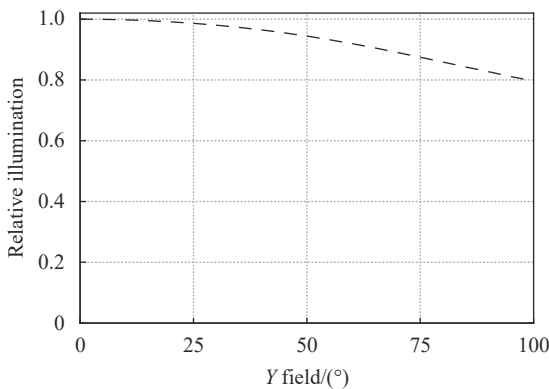


图 7 相对照度

Fig.7 Relative illumination

光线的入射角小于 1° ，远心度较高。

2.3 $f-\theta$ 畸变

全视场角超过 180° 的红外鱼眼镜头一般存在较大的桶形畸变，物像不再遵循相似成像的关系，为使鱼眼镜头具有平面像，此时像高与视场选择等距离投影的成像关系，物像关系满足 $y = f'\theta$ ，像高与视场角具有线性关系。 $f-\theta$ 畸变表示为：

$$dist = ((y - f'\theta)/f'\theta) \times 100\% \quad (15)$$

利用光学设计软件中的操作数可以控制不同视场所对应的像高值，从而有效控制其 $f-\theta$ 畸变。如图 8 所示，系统 $f-\theta$ 畸变最大值不超过 6%，图 9 进一步给出实际成像投影和等距离投影之间的关系，可以看出像高与视场角呈线性关系。

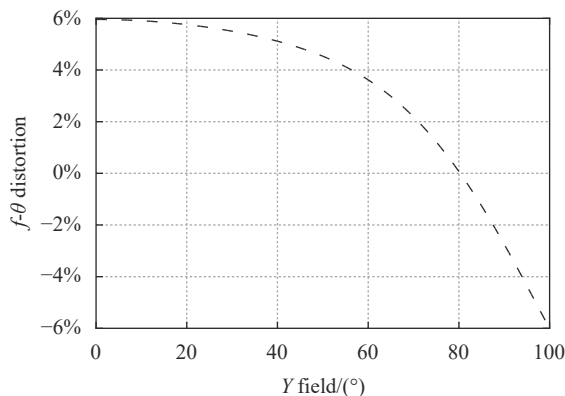


图 8 $f-\theta$ 畸变图

Fig.8 $f-\theta$ distortion

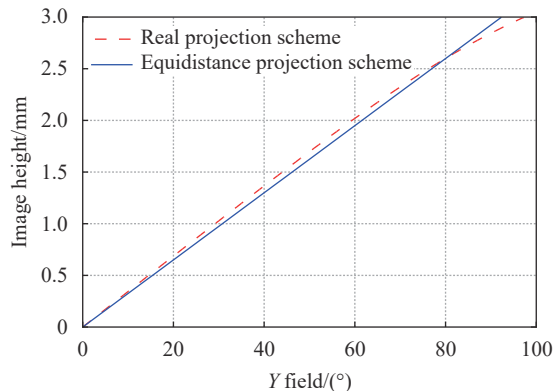


图 9 实际投影和等距离投影的比较

Fig.9 Comparison of the real projection scheme to an ideal equidistance projection scheme

3 机械被动式无热化设计

红外光学系统一般要求在较宽的温度范围内能稳定工作，红外材料的折射率随温度变化较大，温度变化会造成各元件折射率、曲率半径、厚度及空气间隔的改变，从而造成离焦像面漂移。红外光学系统的无热化设计常采用主动式和被动式两种方法，主动式是通过传感器探测温度变化，计算温度变化产生的像面漂移，然后利用电机驱动控制像面移动来实现无热

化,主动式一般结构较为复杂。被动式分为光学被动式和机械被动式^[19-20]。光学被动式是利用材料不同的热膨胀系数的组合实现系统的无热化,一般需要三种以上的组合材料。光学被动式结构虽然简单,但可供使用的红外材料种类有限,实现存在一定困难。由于该系统设计只采用了 Ge 一种红外光学材料,无法利用光学被动式的方法来实现无热化,故设计中采用机械被动式结构实现无热化,利用内外层结构件的热膨胀和收缩来抵消补偿像面的位移。设计使用双层镜筒结构,镜筒采用低热膨胀系数 ($23.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) 的铝材料,驱动透镜移动的补偿机构采用高热膨胀系数 ($41 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) 的镉材料。利用结构材料的周向膨胀驱动凸轮进而实现轴向驱动。系统前四片透镜为前固定组,将最后一块透镜及成像靶面设置为后补偿组。利用简单机械结构的热膨胀驱动无热化补偿组前后移动。表 3 给出了不同温度下系统后截距所需要的补偿量,可以得到系统后截距总的补偿量为 0.07 mm。

表 3 不同温度下系统后截距所需补偿量

Tab.3 Compensation amount of back focal length at different temperature

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Back focal length/mm	Shift distance/mm
-40	3.38	+0.04 (Right)
20	3.34	0
60	3.31	-0.03 (Left)

利用内层外层材料热膨胀系数的差异来补偿后截距的改变,通过公式 (16) 计算伸缩材料的长度:

$$\Delta L = (L_h \times a_h - L_l \times a_l) \times \Delta T \quad (16)$$

式中: L_h, L_l 分别表示高热膨胀系数与低热膨胀系数材料的长度; a_h, a_l 分别表示高热膨胀材料与低热膨胀材料的热膨胀系数; ΔT 表示温差范围。经计算,铝材料的长度为 40 mm, 镉材料的长度为 6 mm, 补偿量 ΔL 为 0.07 mm, 与前述软件得到的系统的后截距补偿量一致。

图 10(a)~(c) 分别为 20、-40、60 $^{\circ}\text{C}$ 时系统的 MTF, 可以看出, 经机械后焦补偿后系统的 MTF 改变量很小, 成像质量仍然接近衍射极限。

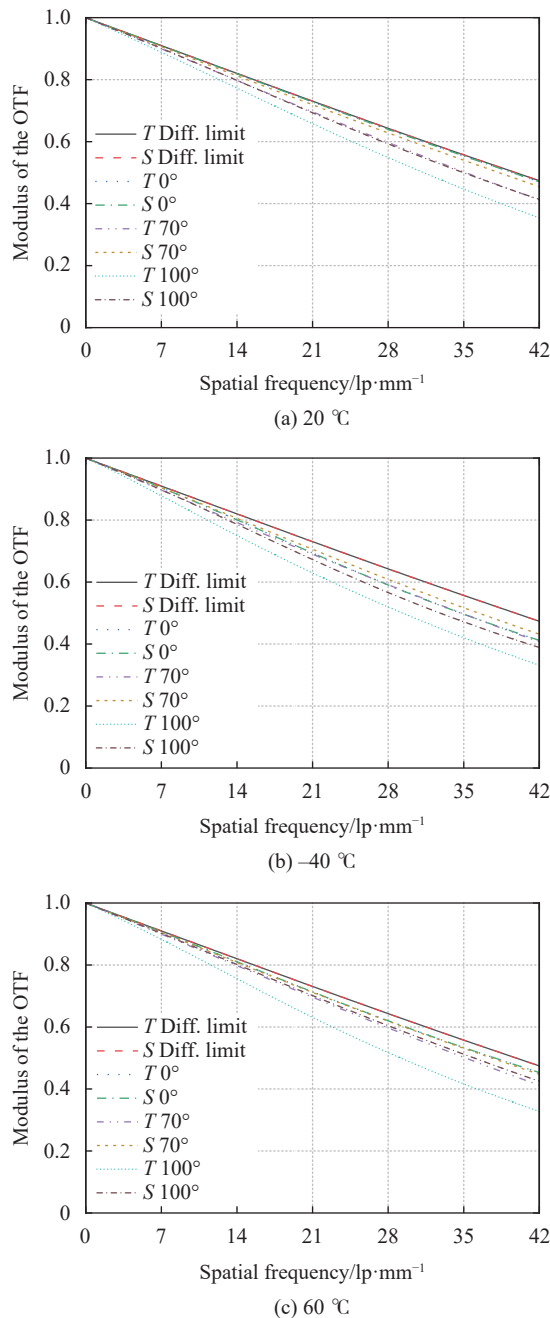


图 10 不同温度下的 MTF

Fig.10 MTF at different temperature

4 结论

文中提出了一种新型的长波红外鱼镜头设计方法, 超大视角鱼镜头的初始结构计算中, 常规反远距镜头的计算已不适用此类结构, 该设计在常规广角镜头的基础上增加负光焦度的前组, 通过高斯光学理论计算前后组相关参数, 将其物方半视场角由原来的 $\pm 70^{\circ}$ 增加到 $\pm 100^{\circ}$ 。所设计的长波红外鱼眼凝视光

学系统同时兼具大孔径与大视场角,系统相对孔径为 1 : 1,采用五片全锗的光学材料,为了校正三级像差,提高系统的成像分辨率,采用了五片非球面的成像设计,系统采用机械被动式的无热化设计方法。由设计结果可以看出,该系统结构简单紧凑,相对孔径大,像面照度均匀,可以广泛应用于环境监测、机器视觉、激光告警、目标跟踪和识别等领域。

参考文献:

- [1] Zhang Shuai, Liu Bingqi, Huang Fuyu, et al. Super wide field of view staring infrared imaging technology and its application [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(10): 1176-1182. (in Chinese)
- [2] Kweon G, Choi Y, Laikin M. Fisheye lens for image processing applications [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2008, 12(2): 79-87.
- [3] Choi H, Kim W C. Optical system design for light detection and ranging sensor with an ultra-wide field-of-view using a micro actuator [J]. *Microsystem Technologies*, 2020, 26(11): 3561-3567.
- [4] Meng Qingyu, Dong Jihong, Qu Hongfeng, et al. Light optical system design with wide spectral band, large field of view for deep space exploration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(1): 135-140. (in Chinese)
- [5] Wu Haiqing, Zhao Xinliang, Li Tonghai, et al. Design of refractive/diffractive IR fish-eye optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(8): 1533-1536. (in Chinese)
- [6] Fu Yuegang, Huang Yunhan, Liu Zhiying. Design of dual-band athermal infrared fisheye optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3329-3333. (in Chinese)
- [7] Duan Qiqiang, Zhang Yue, Chen Xianya, et al. Design of compact infrared panoramic lens [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(6): 062202. (in Chinese)
- [8] Thibault S. Optical design of an hemispherical, long-wave infrared panomorph lens for total situational awareness [C]// Proceedings of SPIE, 2009, 7298: 72980Y.
- [9] Druart G, Guerineau N, Taboury J, et al. Compact infrared pinhole fisheye for wide field applications [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(6): 1104-1113.
- [10] Zhou Yulong. Image analysis of ultra-wide field of view infrared warning system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(6): 871-875. (in Chinese)
- [11] Lv Lijun, Wu Xuewei. Design of initial structure of fisheye lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0208001. (in Chinese)
- [12] Cao Yiqing, Shen Zhijuan, Zhang Ruihua. A design method of fisheye lens with a large acceptance aperture [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2020, 31(1): 13-20. (in Chinese)
- [13] Pernechele C, Consolaro L, Jones G H, et al. Telecentric F-theta fisheye lens for space applications [J]. *OSA Continuum*, 2021, 4(3): 783-789.
- [14] 胡家升. 光学工程导论[M]. 第2版. 大连: 大连理工大学出版社, 2005.
- [15] Huang M, Wu J, Zhiyong P, et al. High-precision calibration of wide-angle fisheye lens with radial distortion projection ellipse constraint (RDPEC) [J]. *Machine Vision and Applications*, 2022, 33(3): 44.
- [16] Wang Yongzhong. Some key problems about the design of IR thermal imaging fish-eye Lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 34(7): 1078-1080. (in Chinese)
- [17] Wang Yongzhong. CAD of LWIR and MWIR fish-eyes lens [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2005, 24(6): 57-60. (in Chinese)
- [18] Herzberger M. Modern Geometrical Optics[M]. New York: Interscience Publisher, 1958.
- [19] Wu Haiqing, Tian Haixia, Cui li. Design of mechanically athermalized longwave infrared optical system with wide field of view and large relative aperture [J]. *Infrared*, 2015, 36(8): 1-4. (in Chinese)
- [20] Wu Xiaojing, Meng Junhe. Athermalizing infrared optical systems by using simple mechanical framework [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 391-393. (in Chinese)