

文章编号:1004-4213(2010)08-1533-4

折射/衍射红外鱼眼镜头光学系统设计

吴海清,赵新亮,李同海,田海霞,崔莉

(中国空空导弹研究院,河南 洛阳 471009)

摘要:讨论了折射/衍射红外鱼眼镜头的设计.设计出工作波段为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$,全视场为 240° 的折衍混合的红外鱼眼镜头光学系统.采用反远距结构,能够很好地解决超广角镜头的轴外像差和边缘像面照度问题.结果表明:系统结构简单,体积很小、后工作距离大,成像质量好,在截止频率 $11\ \text{lp/mm}$ 处的调制传递函数值大于 0.5 .

关键词:鱼眼透镜;光学设计;红外光学;衍射光学

中图分类号: O439; TH74

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103908.1533

0 引言

鱼眼镜头作为一种视场角能达到 200° 以上的特殊镜头是现代科技领域所需要的.因为具有超大视场,因此,可以利用其进行全方位的成像,这项技术具有强烈的临场感和空间感;利用鱼眼镜头的大视场连续拍摄和记录地平线以上云层的照片,经过比较,可以找到云层变化的规律从而提高天气预报准确性.此外,红外波段的鱼眼镜头在管道检测、防火监视、公安、边防警戒等方面具有重要作用;而在国防和军事上,它们更是占有重要而不可替代的地位,尤其是用于中波和长波红外波段的红外热成像鱼眼镜头,因其能够实现全空域包容和全时域实时信息的获取,特别符合现代战争对信息获取技术的需要,这是其他光电侦测手段力不能及的^[1-2].鉴于红外鱼眼镜头的重要性,对红外波段鱼眼透镜设计的研究具有重要价值.

然而,设计超广角的红外鱼眼镜头光学系统所面临的问题是轴外像差难以消除,像面边缘照度太低.而且传统的光学系统结构复杂、镜片数量多造成系统透过率低、系统分辨率也低.利用折衍混合元件研制的光学系统,由于衍射光学元件具有负色散特性、负温度特性、可实现对光波面的任意相位调制,与折射元件配合,在改善系统成像质量、减小系统体积和重量以及降低成本等方面具有无可比拟的优势,从而使得设计大视场的红外鱼眼镜头光学系统具有可行性.

本文设计了全视场角为 240° 的折衍混合红外鱼眼镜头光学系统,该系统由四片透镜组成,包含一个非球面和一个衍射面.给出了设计结果,该系统结构简单、像面均匀性好、后工作距大,讨论了各种像

差的表现情况,最后给出了该镜头的衍射面和非球面的结构参量.

1 鱼眼镜头光学系统设计

1.1 设计方法

在红外鱼眼镜头的光学系统设计中,因其材料的特殊性,要求设计的光学系统结构不能过于复杂、镜片数量不能太多,这也给相应的光学系统的设计提出了更高的要求.本系统中,在折射元件中引入衍射面构成折衍混合光学系统,利用衍射元件可实现对光波面的任意相位调制的特性,使得设计的系统简单化.

鱼眼镜头的设计采用反远距型光学结构^[3],像方主平面位于镜头外部,具有长工作距离.如图 1,镜头前方光学组件的光焦度为负,后方镜组的光焦度为正.轴外光线经过前组负透镜的发散之后,使得其与光轴的夹角明显变小,有利于后组元件的像差校正,此外,光学系统视场边缘照度与视场中心的照度按 $\cos^4\omega'$ 衰减,对于大视场光学系统来说,边缘光照度降低会很严重,采用反远距结构因其前组负光焦度产生大的桶形畸变,使得像方视场角减小,可以有效减缓边缘照度下降,像面照度更加均匀.系统初始结构求解过程如下.

在归一化条件下,即总光焦度 $\varphi=1$,设 φ_1 为前组光焦度, φ_2 为后组光焦度, d 为前后组距离.当令轴上光线以 $h_1=1$ 的高度入射时,从后组出射后与光轴的夹角 $u'_2=1$,假定轴外主光线通过后组主点,则其在后组的入射高度 $h_{p_2}=0$.再令轴外主光线与光轴夹角 $u_{p_1}=-1$,此时 $l'_{p_1}=d$ 而 $j=-h_1u_{p_1}=1$,设前组主光线的角放大率的倒数为 $1/\gamma_1=u_{p_1}/u'_{p_1}=1-d\varphi_1$.而且 $l'_2=h_2=1-d\varphi_1=1/\gamma_1$,即前组角放大率的倒数为高斯光束的工作距离.

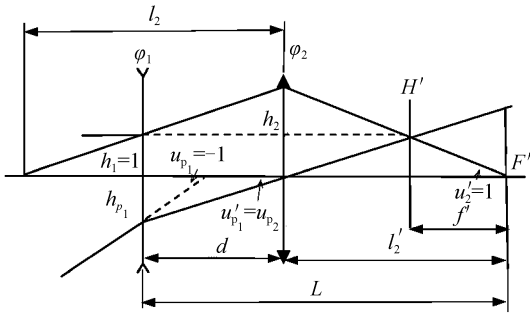


图1 反远距物镜的基本结构图
Fig.1 Structure of inverted telephoto lens

此时总长为

$$L = d + l_2' = \frac{1}{\gamma_1} + (1 - \frac{1}{\gamma_1}) / \varphi_1 \quad (1)$$

前后两组的光焦度与 $1/\gamma_1$ 的关系为 $\varphi_2 = \gamma_1(1 - \varphi_1)$, 前组负担的孔径角为 $u_1' = \varphi_1$, 后组负担的孔径角为 $u_2' - u_1' = 1 - \varphi_1$, 前组轴外主光线负担的相对孔径为

$$2h_{p1}\varphi_1 = \frac{2(\frac{1}{\gamma_1} - 1)}{\frac{1}{\gamma_1}} \quad (2)$$

而前组的轴外主光线高度

$$h_{p1} = (\frac{1}{\gamma_1} - 1) / (\frac{1}{\gamma_1}\varphi_1) \quad (3)$$

式中 h_2 为轴上点边缘主光线在后组的入射高度, h_{p1} 为轴外主光线在前组的入射高度. 由上面的公式用事先给定的 $1/\gamma_1$ 和 φ_1 求出 φ_2, h_2, h_{p1} 和总长度 L 并能够计算出前后组的相对孔径, 这样就确定了系统的初始结构.

1.2 设计指标

跟据长波红外探测器的技术参量, 设计一个焦距为 5 mm, F 数为 2 的光学系统.

探测器参量: 光谱范围为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$, 中心波长 $10 \mu\text{m}$; 320×240 凝视红外焦平面阵列, 像元尺寸为 $45 \mu\text{m}$, 表 1 给出了系统设计指标.

表 1 系统的相关参量

Table 1 Parameters of the system

Parameters	Value
Filed of view/(°)	240
F#	2
Effective focal length/mm	5
Wavelength range/ μm	$8 \sim 12$

2 设计结果及像差分析

对于反远距光学系统, 需要其有大的后工作距 l_2' , 由前面所述公式 $l_2' = h_2 = 1 - d\varphi_1$ 可见, 后工作距离的增大必然导致间距 d 的增大, 为使系统总长不至于太长, 且保证前组具有合理的光焦度, 取 $1/\gamma_1 = 4, d = 15$, 则可得 $\varphi_1 = -0.16$, 由 $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 -$

$d\varphi_1\varphi_2$, 得 $\varphi_2 = 0.386$. 根据系统设计指标, 要求系统焦距为 5 mm, 故将所得归一化参量放大 5 倍, 即为实际光学系统的初始结构参量. 在光学设计软件中经过调整优化, 设计了图 2 所示的红外鱼镜头光学系统, 系统焦距 f' 为 5 mm, 前组焦距 f_1' 为 -27.916 mm , 后组焦距 f_2' 为 18.95 mm , 全视场为 240° , 后工作距离为 28.5 mm. 系统总长为 157.8 mm. 结果表明此系统结构简单, 体积小、后工作距离大, 成像质量好, 满足设计要求.

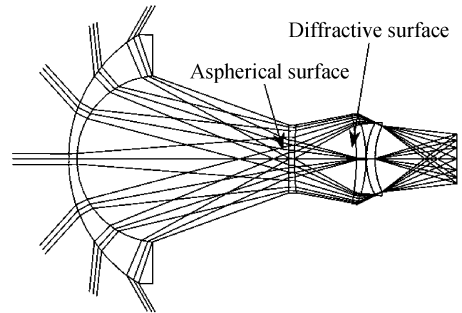


图2 系统结构图
Fig.2 Layout of system

图 3 给出了系统垂轴像差曲线, 可见系统子午方向垂轴像差最大, 但不大于 $42 \mu\text{m}$. 图 4 为系统的调制传递函数曲线, 横坐标和纵坐标分别为像面上的空间频率和光学系统的光学传递函数值, 可见和所选像元尺寸 $45 \mu\text{m}$, 像元数 320×240 的 CCD 对应的空间分辨力为 11 lp/mm 时, 边缘视场的 MTF 值最小, 等于 0.54. 系统的点列图如图 5, 系统成像光斑均方根半径均小于探测器的像元尺寸, 表明该镜头可适用于像元尺寸大于 $45 \mu\text{m}$ 的面阵红外探测器. 图 6 为系统的相对照度曲线, 由图可见, 在像面的边缘处的照度为中心照度的 86%, 系统像面照度的均匀性很好. 图 7 给出了此系统在接收半径为 $45 \mu\text{m}$ 的探测器敏感元内的衍射能量曲线, 从图中可以看出系统能量均大于 85%, 满足了红外探测器包围圆能量大于 80% 的基本需求. 图 8 为场曲和畸变曲线, 可以看出, 系统的弧矢方向最大场曲为

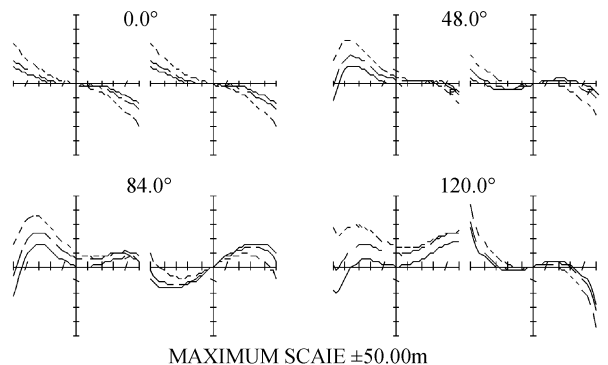


图3 垂轴像差
Fig.3 Transverse ray fan plot

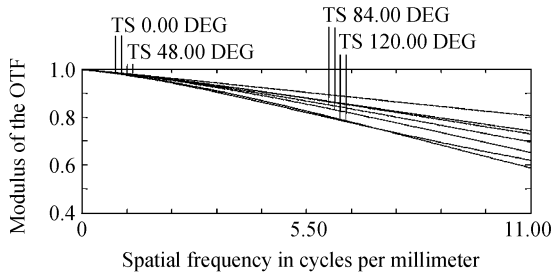


图 4 系统调制传递函数(MTF)
Fig. 4 Modulation transfer function (MTF)

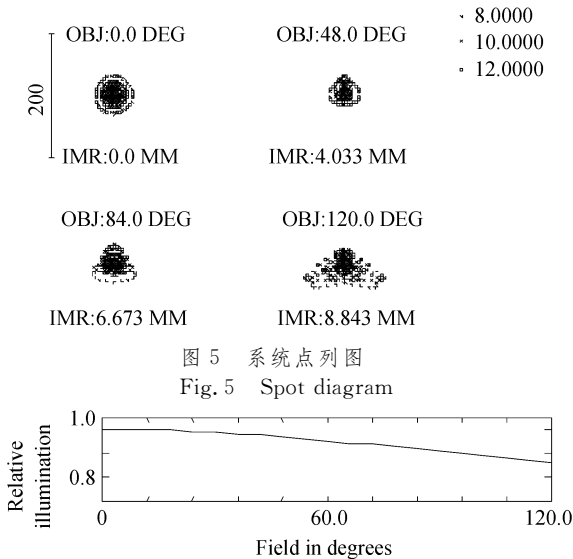


图 5 系统点列图
Fig. 5 Spot diagram

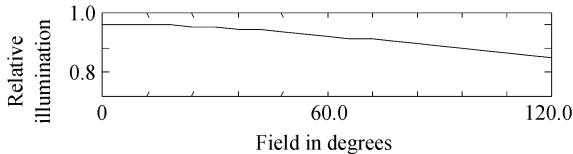


图 6 相对照度图
Fig. 6 Relative illumination

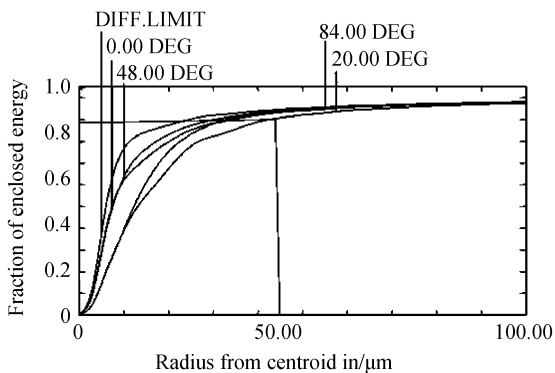


图 7 径向能量分布曲线
Fig. 7 Radial energy distribution

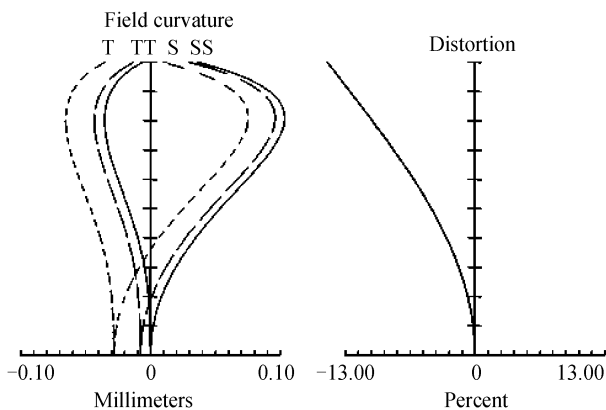


图 8 场曲畸变图
Fig. 8 Field curvature and distortion

0.1 mm,子午方向最大场曲为-0.1 mm,像散为0.2 mm,系统 f -theta 畸变为-13%。

对于理想光学系统,入射光经过透镜的折射成像,像高与视场角的关系为 $h = f' \tan \theta$,而对于视场超过 180° 的鱼镜头而言由于存在大的桶形畸变,物像关系不遵循 $h = f' \tan \theta$ 的关系而是 $h = f' \theta$,像高与视场角具有线性关系,这使得鱼镜头光学系统具有平面像.对于此系统, f -theta 畸变表达式为 $\text{dist} = ((h - f' \theta) / f' \theta) 100\%$.在光学设计软件 ZEMAX 中读取不同视场及对应的像高计算,得出所设计的红外鱼镜头光学系统的 f -theta 畸变与视场的关系曲线如图 9,实际计算结果与软件模拟值一致,可见此系统像高与视场角具有线性关系。

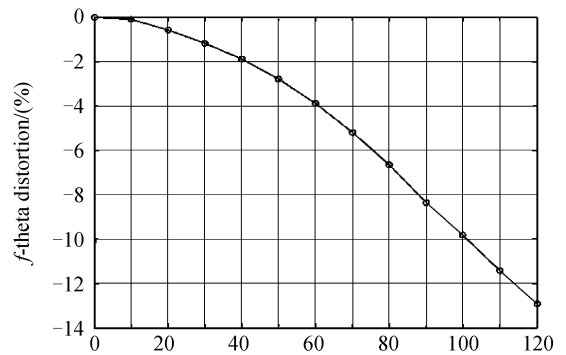


图 9 f -theta 畸变图
Fig. 9 f -theta distortion

3 非球面与衍射面

由 ZEMAX 软件给出的旋转对称衍射面位相分布式为^[4-6]

$$\varphi(\lambda) = c_1 r^2 + c_2 r^4 \quad (4)$$

由式(4)可得,当 $\varphi(\lambda) = \pm 2m\pi$ ($m = 1, 2, \dots, m_{\max}$) 时,衍射面上的环带总数为

$$K = \text{int} \left\lfloor \frac{c_1 r_{\max}^2 + c_2 r_{\max}^4}{2\pi} \right\rfloor \quad (5)$$

设计时取 $c_1 = -0.07623$, $c_2 = 8.229329 \times 10^{-6}$,而所设计的衍射面有效口径的半径为 16.2142 mm.图 10 给出设计中所使用二元面的相位函数曲线(线 a)和环带密度曲线(线 b),图 11 为衍射面形状图,由图可知,随着径向坐标的增加,二元面的环带密度增大.由式(5)可计算得衍射面的环带数为 3,特征尺寸为 3.1435 mm,现有的制作工艺能够满足上述非球面和二元衍射面的加工制作。

本设计中的非球面采用 ZEMAX 软件中的 Even Asphere 面型,方程为

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + Ar^2 + Br^4 + Cr^6 + Dr^8 + \dots \quad (6)$$

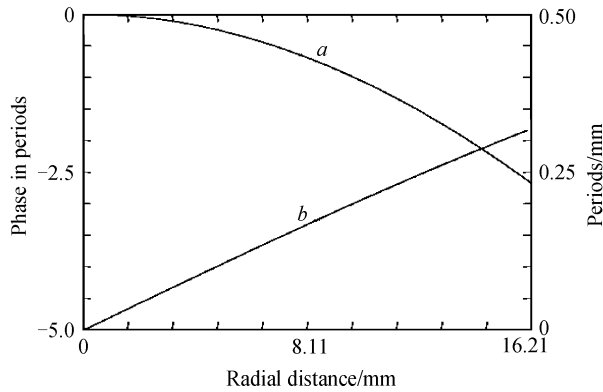


图10 衍射面的相位函数曲线(线a)和环带密度曲线(线b)
Fig. 10 Phase (line a) and ring line density (line b) curves of diffractive

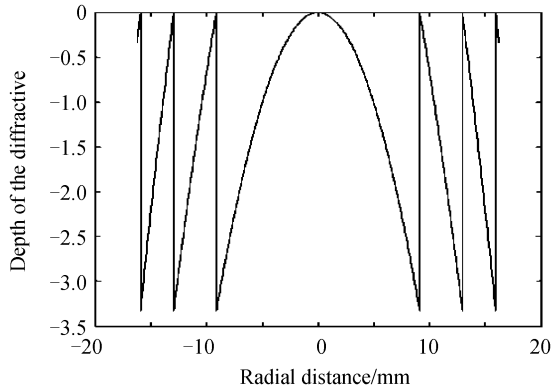


图11 衍射面形状
Fig. 11 Shape of diffractive

式中 c 为曲率, k 为二次曲线常量, A, B 等为非球面系数. 设计取 $k=0, A=-6.6017 \times 10^{-3}, B=-8.7754 \times 10^{-6}, C=-3.09504 \times 10^{-8}, D=3.39949 \times 10^{-11}$.

4 结论

红外鱼镜头因其材料的特殊性,要求设计的光学系统结构不能过于复杂、镜片数量不能太多,本

文采用折射/衍射混合透镜解决了传统纯折射式光学设计中的诸多局限,使得系统保证成像质量的同时结构简单化,设计了全视场达 240° 的折衍混合红外鱼镜头光学系统,使得折衍混合光学系统的应用扩展到了红外波段鱼镜头的设计中. 该系统由四片透镜组成,包含一个非球面和一个衍射面,给出了设计结果,讨论了各种像差的表现情况及非球面和衍射面参量. 结果表明该系统结构简单、像面均匀性好、后工作距大,将在民用、边防、国防和军事上得到广泛的应用.

参考文献

- [1] WANG Yong-zhong. Some key problems about the design of IR thermal imaging Fish-eye lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1078-1080.
王永仲. 红外热成像鱼镜头设计中若干特殊问题的处理[J]. *光子学报*, 2005, **34**(7): 1078-1080.
- [2] WANG Yong-zhong. CAD of LWIR and MWIR fish-eye lens [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2005, **24**(6): 455-458.
王永仲. 长波及中波红外鱼镜头的计算机设计[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(6): 455-458.
- [3] KAMLER J J, BAURE M. Fisheye lens design and their relative performance[C]. *SPIE*, 2000, **4093**: 360-369.
- [4] YANG Xin-jun, WANG Zhao-qi, SUN Qiang, et al. Design of the optical system for a see-through refractive/diffractive hybrid helmet mounted display [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(1): 8-12.
杨新军, 王肇圻, 孙强, 等. 折/衍混合透视型头盔显示器光学系统设计[J]. *光电工程*, 2005, **32**(1): 8-12.
- [5] SUN Qiang, TANG Tong-bin, DONG Guo-cai, et al. Design of the diffractive/refractive optical system in optical collimator of infrared scene generator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(6): 881-883.
孙强, 唐同斌, 董国才, 等. 红外场景产生器折射/衍射准直光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(6): 881-883.
- [6] XU Yan, WANG Zhao-qi, TIAN Ye. Hybrid refractive/diffractive optical system design of a digital retina camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1122-1125.
许妍, 王肇圻, 田野. 基于眼模型的折/衍混合眼底相机设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1122-1125.

Design of Refractive/Diffractive IR Fish-eye Optical System

WU Hai-qing, ZHAO Xin-liang, LI Tong-hai, CUI Li, TIAN Hai-xia

(China Airborne Missile Academy, Luoyang, Henan 471009, China)

Abstract: The optical design and properties of fish-eye lens are discussed. A refractive/diffractive IR fisheye lens optical system is presented, whose operating wavelength range is 8 to $12 \mu\text{m}$, and full field of view is up to 240° . The structure of optical system is reversed telephoto lens, and this type of hyper-wide angle lens can balance the off-axis aberrations against the evenness of marginal image illuminance at its image plane very well. The results show that the system has the advantages of simplicity, compactness and long back working distance. Its imaging quality is very well, so that its modulated transferfunction value is higher than 0.5 when cutoff frequency at the 11 lines/mm.

Key words: Fisheye lens; Optical design; IR optics; Diffractive optics



WU Hai-qing was born in 1982. He received his M. S. degree from Changchun University of Science and Technology in 2009. Now his research interests focus on binary optics and optical design.