

紧凑型红外全景镜头设计

段其强 张悦 陈献亚 丁桂林

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 选用适当的全景环形镜头模型,运用 CODE-V 软件设计了一款小型紧凑结构红外全景镜头。设计结果表明,选用的全景环形镜头模型有利于镜头的小型化和集成化,将模型的两个透射面和两个反射面全部设置为球面,降低了镜头加工的难度,通过优化相对孔径,提高了系统的灵敏度和分辨率。中继系统采用三片式结构,其中非球面和衍射面的运用有效地平衡了系统像差。最终得到的镜头工作在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段,对 $\pm 55^\circ\sim\pm 100^\circ$ 视场成像, F 数为 1.3,有效焦距为 $-0.53\ \text{mm}$,总长为 $64.5\ \text{mm}$,最小分辨极限只有 $6.3\ \mu\text{m}$ 。CODE-V 软件分析显示,系统横向像差在 $-0.021\sim 0.021\ \text{mm}$ 之间,为艾里斑直径的 1.6 倍,调制传递函数(MTF)值在空间分辨频率为 $40\ \text{lp/mm}$ 时大于 0.2,成像质量良好。

关键词 光学设计; 红外全景镜头; CODE-V 软件; 紧凑结构

中图分类号 O436

OCIS 220.3620 260.3060

文献标识码 A

Design of Compact Infrared Panoramic Lens

Duan Qiqiang Zhang Yue Chen Xianya Ding Guilin

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract Through choosing panoramic annular lens model and using CODE-V, a new small infrared panoramic lens with compact structure is completed. The result indicates that panoramic annular lens model is conducive to miniaturization and integration of the lens, and the difficulty of lens's processing is reduced by setting the model's two transmission surfaces and two reflection surfaces to sphere, and the optimizing of the relative aperture can improve system's sensitivity and resolution. The system aberrations are effectively balanced by setting asphere and the diffraction surface in relay system. The lens has a waveband $3\sim 5\ \mu\text{m}$, a field of view $\pm 55^\circ\sim\pm 100^\circ$, F -number of 1.3, effective focal length of $-0.53\ \text{mm}$, overall length of $64.5\ \text{mm}$, and the resolution limit of the lens is only $6.3\ \mu\text{m}$. The analysis of the CODE-V software demonstrates that the lateral aberration of the system is between $-0.021\sim 0.021\ \text{mm}$, only 1.6 times the diameter of the Airy spot, and the value of the modulation transfer function (MTF) is greater than 0.2 at $40\ \text{lp/mm}$, and the lens has a good imaging quality.

Key words optical design; infrared panoramic lens; CODE-V software; compact structure

1 引言

传统镜头一般遵循中心投影法,只能对较小的视场成像,不能直接实现 360° 全景成像。为满足三维空间全景成像的应用要求,需要对 360° 全景视场分段成像,然后对所成的像进行无缝拼接,这种成像模式不能满足实时成像的要求,因而在实时性要求较高的场合受到了限制^[1, 2]。在特殊环境的军事监控以及地下管道探测等领域,需要能够在红外波段工作,且满足 360° 实时成像的红外全景镜头。由于仪器性能的需要,要求安装在仪器上的镜头的重量、体积以及结构尽可能小地影响仪器性能。为满足应用的需求,出现了各种不同类型的红外全景镜头,如红外鱼眼镜头^[3~5]、单反射面折反射红外全景镜头^[3]以及 4 个反射面的折反射红外全景镜头^[6],这些镜头都能满足 360° 实时成像的要求,然而其结构都较为复杂,像差校正困难,且单反射面折反射红外全景镜头外形尺寸较大,不能满足小型化和集成化的要求。1986 年, P. Greguss^[7] 提出了全景环形镜头模型。这种镜头遵循平面圆柱投影法,能够对环绕光轴 360° 的柱面场景成一平面环形像,其镜头

收稿日期: 2009-07-06; 收到修改稿日期: 2009-07-29

作者简介: 段其强(1985-),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: duanqiqiang@163.com

导师简介: 丁桂林(1957-),男,博士,教授,主要从事光学设计及激光传输与控制等方面的研究。

E-mail: guilinding@yahoo.com.cn

的主要部分可以做成模块,能够满足小型化和集成化的要求,且结构简单,成像性能良好,因而得到了广泛的应用。之后,Ian Powell^[5,8]利用全景环形镜头模型设计的红外镜头充分利用了 Greguss 模型的优势,实现了较好的成像效果。

P. Greguss 提出的全景环形镜头模型,成像原理为由两个折射面和两个反射面构成前面的模块,以一定角度入射的光束经全景环形成像模块的两次折射和两次反射后在全景环形模块的内部或后面形成一虚像,中继系统转接中间虚像,并将最后的像成在像面传感器上。全景环形结构的两次反射都发生在全景环形模块的内部,其特殊的结构和成像模式使其对光线的走向有严格的限制,入射的全口径光束中仅有一部分能通过全景环形镜头成像,所以入射光束的宽度相对较小,且不同角度入射的光束从第一个折射面的不同位置入射,相当于扫描成像系统中的角度扫描,整体系统近似满足 $f\theta$ 成像,像高 $h = f\theta$ ^[8~10]。

本文分析了全景环形镜头的成像特性,并在 Ian Powell 镜头的基础上,运用 CODE-V 软件设计了一款工作在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的紧凑型红外全景镜头,其尺寸、重量、灵敏度和分辨率以及成像范围等都优于 Ian Powell 镜头。

2 紧凑型红外全景镜头设计

2.1 初始结构选取

全景环形镜头模型的独特优势,使其在红外全景成像中得到广泛应用。Ian Powell 利用全景环形镜头模型设计了一款工作在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外波段的全景镜头^[8],其成像视场为 $\pm 70^\circ\sim\pm 110^\circ$, F 数为 1.5,总长 130 mm,像差小于 0.02 mm,该镜头在结构和成像质量上都存在非常大的优势,具有非常好的应用前景。

然而,在红外成像中,一般要求镜头系统具有较高的灵敏度^[11],尤其是在军事监控领域,对灵敏度的要求则更高。因此提高镜头灵敏度成为红外全景系统设计的一个较为重要的目标,而提高灵敏度即是要提高系统的相对孔径,增大像面照度,提高分辨率。本文选取 Ian Powell 的镜头模块做初始模型,以提高成像的灵敏度和分辨率为目标,对镜头做进一步优化设计,并重新设计中继系统,对像差进行平衡校正。由于复杂的面型容易产生复杂的高阶像差,且加工困难,因此选用 Ian Powell 所提出的全球面结构,设计时可同时调整 4 个面的曲率半径,从而使系统设计的灵活性大大提高。

2.2 规格要求

所设计的红外全景镜头要求在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段工作,满足对 $\pm 55^\circ\sim\pm 100^\circ$ 的视场成像要求,镜头直径小于 40 mm,总长度小于 70 mm,后工作距离一般要大于 10 mm,要求镜头的最小分辨极限不大于 $7\ \mu\text{m}$,以满足镜头灵敏度的要求。

2.3 全景环形模块的设计

在 CODE-V 光学系统设计软件中,将 Ian Powell 镜头模型的 4 个面的半径和轴上距离设置为变量,调整相对孔径和视场角,并对初始结构反复优化设计。需要注意的是,由于全景环形镜头模型对光路具有较严格的限制,微小的结构改变都会对成像造成较大的影响,因此在设计时需要半径和距离等变量做选择性控制,即每次可设置少数几个变量以观察优化结果,且变量每次的改变量也不能设置过大。模块选用氟化钙(CaF_2)作材料,其折射率为 1.4338。最终优化结果如表 1 所示。

表 1 全景模块结构数据

Table 1 Structure data of the panoramic block

Surface	Type	Y radius /mm	Thickness /mm	Glass	Mode	Y semi-aperture /mm
1	Sphere	29.9121	18.3332	CaF_2	Refract	19.6559
2	Sphere	-12.2254	-17.0000	CaF_2	Reflect	9.9917
3	Sphere	-12.2254	15.0000	CaF_2	Reflect	4.2000
4	Sphere	43.0644	14.9105		Refract	

由图 1 可以看出,系统的孔径像差很小,不同视场处的主光线和边缘光线在孔径光阑处几乎交于一点,表明该结构较好地校正了系统的孔径像差,具有良好的成像特性。

2.4 中继系统设计

在全景成像系统中,中继系统起着非常重要的作用,它承担着对中间像进行二次成像的功能,并且可以平衡和校正整体系统的像差,因此要设计一个好的中继系统要考虑多方面的因素。在红外全景成像系统设计中,由于材料的限制和对成本的考虑,不可能使用很复杂的结构,因而考虑选取传统三片式结构,通过设置非球面和衍射面来校正和平衡系统像差,而衍射元件不同一般光学元件的色散特性也可以用来校正系统色差^[12~14]。

在 CODE-V 软件设计中,设置三片式结构的第 1 和第 3 片的前表面为非球面,面型结构满足表达式^[15]

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + \dots, \quad (1)$$

式中 c 为非球面的中心曲率, k 为圆锥曲线系数, A, B, C, D, \dots 为高次非球面系数,同时在第二片的前表面设置旋转对称二元衍射面,其相位函数满足表达式^[15]

$$\varphi(r) = \frac{2\pi}{\lambda_0}(c_1r^2 + c_2r^4 + c_3r^6 + \dots), \quad (2)$$

式中 λ_0 为设计波长, c_1, c_2, c_3, \dots 为衍射面的相位系数。设置变量并利用软件反复优化设计,最终设计结果如图 2 所示。其中第 1 片和第 3 片为硅材料,对工作波段的折射率为 3.5907,第 2 片为锗材料,对工作波段的折射率为 4.0243,特殊的面型结构使中继系统只用 3 片镜片就实现了良好的成像效果,并在一定程度上简化了整体系统的结构,减小了镜头的体积和重量,节省了红外材料,降低了成本。

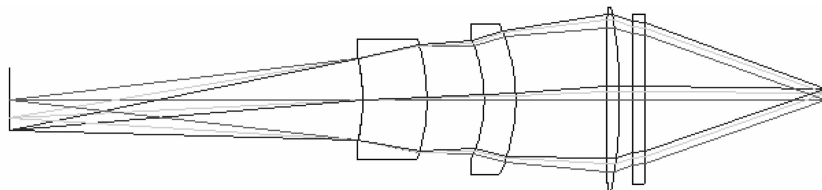


图 2 中继系统

Fig. 2 Relay system

2.5 整体系统设计和像面 CCD 选取

在前面设计的基础上,对前置全景环形镜头模块和中继系统耦合,使全景环形模块的出瞳和中继系统的入瞳重合,利用 CODE-V 软件对整体系统进行优化,使中继系统和前置全景环形模块之间的像差互相平衡,最终实现整体系统像差校正。设计结果如表 2 所示,其中非球面和衍射面系数如表 3 和表 4 所示。

表 2 全景镜头系统结构数据

Table 2 Structure data of the panoramic lens

Surface	Type	Y radius /mm	Thickness /mm	Glass	Mode
Object	Sphere	Infinity	Infinity		
1	Sphere	29.9121	18.3332	CaF ₂	Refract
2	Sphere	-12.2254	-17.0000	CaF ₂	Reflect
3	Sphere	-12.2254	15.0000	CaF ₂	Reflect
4	Sphere	43.0644	14.9107		Refract
5(Stop)	Asphere	-14.9350	5.0000	Silicon	Refract
6	Sphere	-16.0351	5.0000		Refract
7	Sphere	-11.4690	2.8556	Germanium	Refract
8	Sphere	-14.2457	3.9003		Refract
9	Asphere	69.6067	1.6457	Silicon	Refract
10	Sphere	-56.6592	2.1724		Refract
11	Sphere	Infinity	2.0000	Silicon	Refract
12	Sphere	Infinity	12.1737		Refract
Image	Sphere	Infinity			

表3 非球面系数
Table 3 Asphere coefficient

	Surface 5	Surface 9
<i>R</i>	-14.9350	69.6067
<i>K</i>	1.4310	-15.8181
<i>A</i>	-5.6092×10^{-5}	-1.1757×10^{-6}
<i>B</i>	-5.4939×10^{-7}	-1.2321×10^{-8}
<i>C</i>	1.6814×10^{-8}	1.6644×10^{-11}
<i>D</i>	-8.8032×10^{-10}	1.6026×10^{-15}

表4 衍射系数
Table 4 Diffraction coefficient

	Surface 7
Diffraction order	1
Construction wavelength /nm	4000
c_1	-5.1486×10^{-4}
c_2	-3.1018×10^{-6}
c_3	2.0439×10^{-8}
c_4	2.5136×10^{-9}
c_5	-3.5276×10^{-11}

最终系统结构图如图3所示,图中系统成像结构合理,光路顺畅,无表面重叠交叉现象。CODE-V光学系统设计软件显示,系统像高为0.92 mm,最小分辨极限 $6.3 \mu\text{m}$,为使镜头的性能得到最大的发挥,所选 CCD 的分辨极限要和镜头相匹配,因此选取最小像素单元尺寸为 $6.5 \mu\text{m}$ 的红外 CCD 像面传感器,其中 CCD 的中心敏感区域大小为 $2.55 \text{ mm} \times 1.91 \text{ mm}$,保证所成像能够完全显示在 CCD 中心敏感区域。

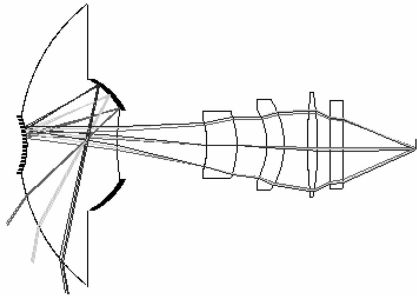


图3 紧凑型红外全景镜头

Fig. 3 Compact infrared panoramic lens

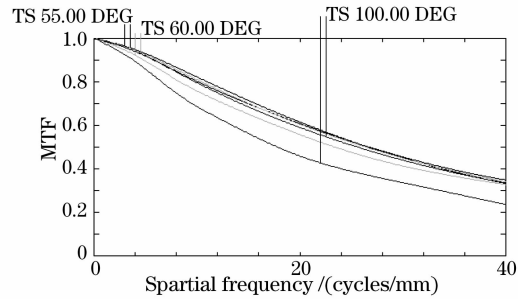


图4 常温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 MTF 曲线图

Fig. 4 MTF curve at $20 \text{ }^\circ\text{C}$

2.6 成像结果分析

CODE-V 优化设计结果显示,镜头在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段工作,对 $\pm 55^\circ \sim \pm 100^\circ$ 视场成像,系统有效焦距为 -0.53 mm ,总长 64.5 mm ,整个系统只用了氟化钙、硅和锗3种材料。镜头系统数据显示, F 数只有1.3,有较大的相对孔径,系统灵敏度得到了较大提高,由分辨极限公式 $1.22\lambda F/\#$ 可以得到,镜头的最小分辨极限仅有 $6.3 \mu\text{m}$,即镜头能分辨的最小尺寸可以达到 $6.3 \mu\text{m}$ 。对比总长 130 mm 和 F 数为1.5的 Ian Powell 镜头,本设计在灵敏度和分辨率上有了较大提高,且镜头的尺寸和重量都有了明显减小,应用优势明显。

图4为系统的MTF曲线,在频率 40 lp/mm 时,各视场的MTF值都大于0.2,像面明锐度和对比度满足像质要求;图5为系统的轴向球差以及场曲和像散曲线,其中轴向球差在 $-0.02 \sim 0.02 \text{ mm}$ 之间,像散和场曲在 $-0.025 \sim 0.025 \text{ mm}$ 之间,表明球差、像散和场曲等轴向像差都得到了有效校正;图6为系统横向像差曲线图,其中横向最大几何像差为 0.021 mm ,只有艾里斑直径的1.6倍;图7为系统的点列图,图中显示系统存在一定的像弥散,这是由于为提高系统的灵敏度和分辨率而引入了一定的边缘像差,这在一定情况下是允许的,且系统最大弥散斑均方根(RMS)直径只有 0.012 mm ,小于2倍的最小分辨极限,像弥散仍然满足像质要求。

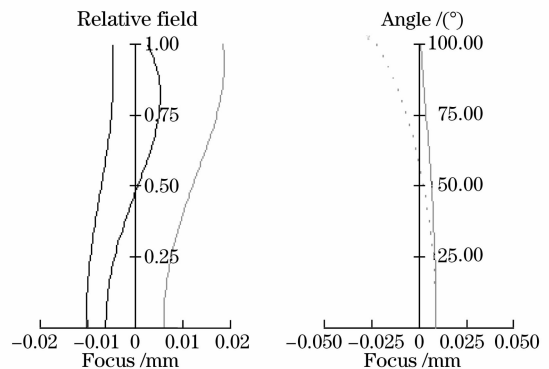


图5 (a)球差, (b)像散和场曲

Fig. 5 (a) Longitudinal spherical aberration, (b) astigmatic and field curves

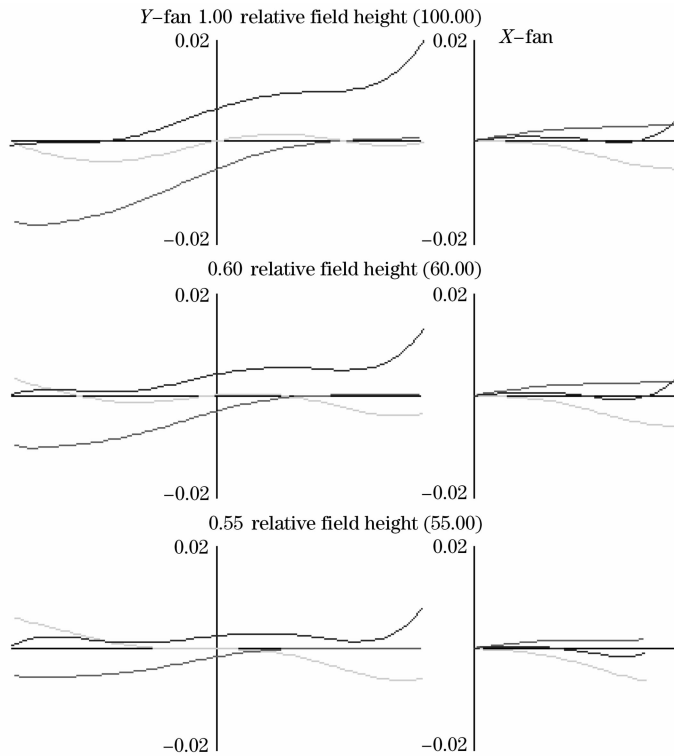


图6 横向像差图

Fig. 6 Aberration curves

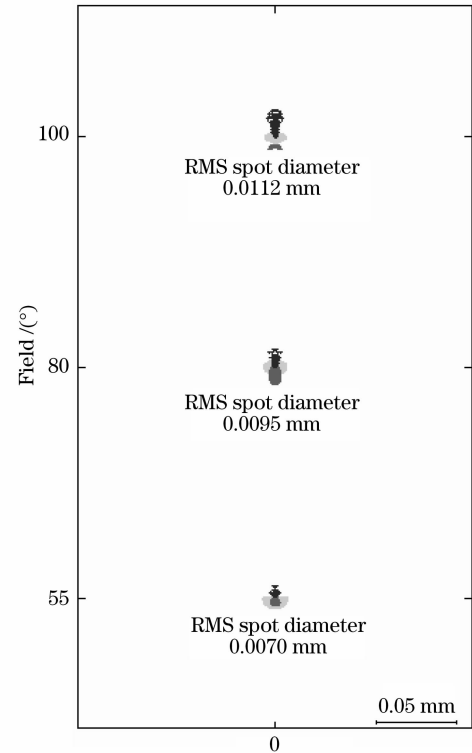


图7 点列图

Fig. 7 Spot diagrams

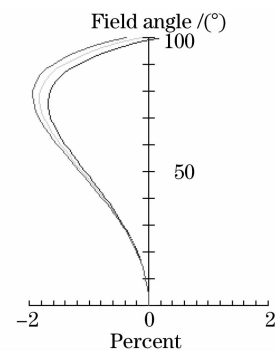
2.7 实际像高与 $f\theta$ 像高对比及其相对于 $f\theta$ 像高的偏移量

由前面的分析可知,全景环形镜头近似满足 $f\theta$ 成像,由焦距 $f = -0.5285$ mm 将不同视场的主光线在像面上的高度 h_{real} 和 $f\theta$ 像高 $h_{f\theta}$ 列表做一对比,表5中 $f\theta$ 像高由公式 $h_{f\theta} = f\theta$ 求得,实际像高通过 CODE-V 软件进行光线追踪得到,偏移量由公式 $(h_{\text{real}} - h_{f\theta}) / h_{f\theta} \times 100\%$ 得到,图8为系统的 $f\theta$ 畸变图,由表5和图8可以看出,各视场的真实像高和 $f\theta$ 像高差值很小,其偏移量百分比都在 $-2\% \sim 0\%$ 以内,真实像高和 $f\theta$ 像高符合得很好,验证了全景环形镜头的 $f\theta$ 成像特性。

表5 像高、畸变与视场角的对应关系

Table 5 Image height and distortion as a function of the field angle

Field angle / (°)	$h_{f\theta}$ / mm	h_{real} / mm	Discrepancy / %
55	-0.50732	-0.50078	-1.289
60	-0.55344	-0.54534	-1.464
65	-0.59956	-0.58985	-1.620
70	-0.64568	-0.63444	-1.741
75	-0.69180	-0.67929	-1.808
80	-0.73793	-0.72464	-1.801
85	-0.78405	-0.77088	-1.680
90	-0.83017	-0.81853	-1.402
95	-0.87629	-0.86705	-1.054
100	-0.92241	-0.92152	-0.096

图8 $f\theta$ 畸变Fig. 8 $f\theta$ distortion

3 衍射光学元件对温度影响的校正

由于硅、锗等红外光学材料的折射率随温度变化而变化,因此,要使镜头能在不同温度环境下良好工作,需要对镜头做消热差设计,即要对温度影响做补偿,这就要求镜头在校正像差的同时要校正热差。衍射光学元件不仅在校正色差方面有其独特性,而且还具有特殊的温度特性,即一般折射元件的温度特性不仅取决于

材料的热膨胀系数,还取决于材料的折射率温度特性。而衍射光学元件的温度特性只与材料的膨胀系数有关,与材料的折射率无关,因此当温度发生变化时,衍射光学元件的光热膨胀系数始终为正或为负,即符号不变,而折射光学元件的光热膨胀系数可正可负^[16],因此可以利用衍射光学元件的特殊温度特性来校正温差。设计结果显示,图9,10分别为-20℃和60℃时的MTF曲线,和常温20℃时对比,下降不大,在40lp/mm时MTF值大于0.1,仍然满足像质要求,即当温度在-20℃~60℃之间变化时,温差对成像质量的影响得到了较好的补偿,可以满足该温度范围环境下的应用。

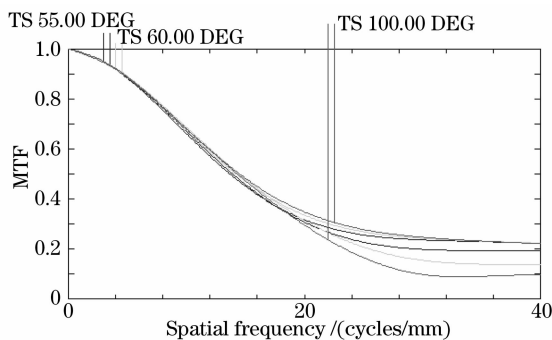


图9 -20℃时的MTF曲线
Fig. 9 MTF curves at -20℃

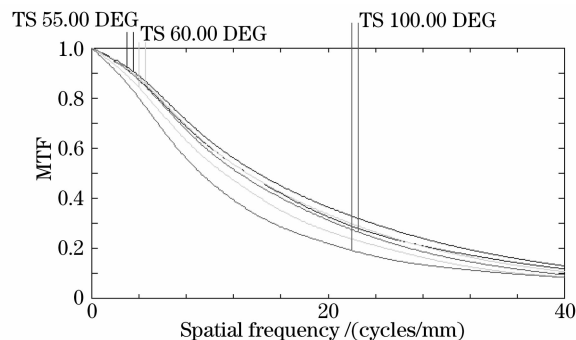


图10 60℃时的MTF曲线
Fig. 10 MTF curves at 60℃

4 红外镜头的加工

红外材料不同于一般的玻璃材料加工具有一定的难度^[17~20]。CaF₂材料存在解理面,容易发生解理,硅、锗对镜片表面光洁度有较高的要求,因此在加工过程中需要做特殊的处理。1)对于CaF₂模块,晶体切割过程中要使加工面和解理面相互错位,防止解理,且由于晶体在不同方向的机械性能不一样,因此切割时需要采用不同的进刀速度和切割方向。在抛光过程中,传统的机械抛光加工容易在表面残留划痕,且会破坏表面下层晶体结构,因此采用金刚石车削韧性加工,保证了表面的精度和光洁度。2)硅镜片在双面抛光机上进行双面抛光,并采用抛光液,从而提高表面光洁度。3)锗晶体材料比较昂贵,因此在选材时要根据设计尺寸选择材料,对材料进行最大利用,锗镜片的加工采用常规工艺的粗磨和细磨,然后进行滚边和抛光,由于锗材料较软,一般要先滚边再抛光,抛光采用化学机械抛光方法,从而保证加工达到设计的要求。

5 结 论

选用全景环形镜头模型,运用CODE-V软件设计了一款工作在3~5μm波段的紧凑型红外全景镜头,初始模型选用Ian Powell设计的红外镜头,以提高系统灵敏度和分辨率为目标,通过调整相对孔径并重新设计中继系统,最终达到了设计规格的要求。所设计的镜头F数为1.3,总长度64.5mm,成像视场范围±55°~±100°,Ian Powell的镜头F数为1.5,总长度130mm,成像视场范围±70°~±110°,对比可以发现,所设计的镜头在分辨极限、灵敏度、镜头体积和重量以及成像范围等方面都优于Ian Powell的镜头,且成像质量好,横向最大几何像差仅有0.021mm,系统MTF曲线在频率40lp/mm时各视场的MTF值都超过了0.2,像面明锐度和对比度满足像质要求,球差、像散和场曲等轴向像差都得到了有效的校正,f-θ畸变绝对值小于2%,系统整体结构紧凑,尺寸重量较小,整个系统只用了氟化钙、硅和锗3种材料,有效控制制造成本,其优良的性能可以满足红外全景监控、地下管道探测等多个方面的应用。

参 考 文 献

- 1 Xiao Xiao, Yang Guoguang. A present and development of panoramic imaging technique[J]. *Optical Instruments*, 2007, **29**(4): 84~89
肖 潇,杨国光. 全景成像技术的现状和进展[J]. *光学仪器*, 2007, **29**(4): 84~89
- 2 Zeng Jiyong, Su Xianyu. Catadioptric omnidirectional imaging system[J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(6): 62~64

- 曾吉勇, 苏显俞. 折反射全景成像系统[J]. 激光杂志, 2004, **25**(6): 62~64
- 3 H. M. Spencer, J. M. Rodgers, J. M. Hoffman. Optical design of a panoramic, wide spectral band infrared fisheye lens [C]. *SPIE*, 2006, **6342**: 63421P
- 4 Troy A. Palmer, Christopher C. Alexay. An infrared modular panoramic imaging objective[J]. *SPIE*, 2004, **5406**: 92~96
- 5 Ian Powell. Design study of an infrared panoramic optical system[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(31): 6190~6194
- 6 A. H. Carrieri. Panoramic infrared-imaging spectroradiometer model with reverse phase-modulated beam broadcasting[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(9): 1952~1964
- 7 P. Greguss. Panoramic imaging block for three-dimension space[P]. US: 4566763, 1986-01-28
- 8 Ian Powell. Panoramic lens[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(31): 7356~7361
- 9 D. R. Matthys, J. A. Gilbert, P. Greguss. Endoscopic measurement using radial metrology with digital correlation[J]. *Opt. Eng.*, 1991, **30**(10): 1455~1460
- 10 Yu Lei. Study of the scanning imaging of panoramic Annular Lens[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. 11~16
余磊. 全景环形透镜扫描成像研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. 11~16
- 11 Zhao Xiuli. Infrared Optical System Design[M]. Beijing: China Machine Press, 1986. 3~5
赵秀丽. 红外光学系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986. 3~5
- 12 Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Design of a hybrid infrared apochromatic optical system beyond normal temperature [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(10): 6298~6303
宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军. 实现复消色差的超常温混合红外光学系统[J]. 物理学报, 2008, **57**(10): 6298~6303
- 13 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 188~195
金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 188~195
- 14 Li Xiangning. Lens design for fresnel collimator with large aperture and linear fields[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(12): 53~58
李湘宁. 大口径线视场菲涅尔准直透镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(12): 53~58
- 15 CODE-V. Optical Design Program, Reference manual[M]. Optical Research Associates, 2003-6
- 16 Wen Yanbo, Bai Jian, Hou Xiyun *et al.*. Design of infrared hybrid athermal optical system[J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(5): 82~86
温彦博, 白剑, 侯西云等. 红外无热化混合光学系统设计[J]. 光学仪器, 2005, **27**(5): 82~86
- 17 Wang Yan, Ning Liwei. Analysis on processing technology of CaF₂ components[J]. *J. Hunan Institute of Engineering*, 2007, **17**(2): 36~39
王艳, 宁立伟. 氟化钙零件加工技术分析[J]. 湖南工程学院学报, 2007, **17**(2): 36~39
- 18 Hu Xiaozhen, Li Wei. A study of double sided polishing processing technic of silicon wafer[J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2009, (4): 139~141
胡晓珍, 李伟. 硅晶片抛光加工工艺的实验研究[J]. 机械设计与制造, 2009, (4): 139~141
- 19 Zhang Yulan, Li Yanjun, Lü Kai *et al.*. Properties and processing technology of Ge single crystal[J]. *J. Changchun University of Science and Technology*, 2005, **28**(4): 106~110
张玉兰, 李延君, 吕凯等. 硅金属单晶材料性能及加工技术研究[J]. 长春理工大学学报, 2005, **28**(4): 106~110
- 20 Guo Yanlong, Wang Shuyun, Yuan Xiao. Research progress of optical application of diamond carbon films and diamond-like carbon films[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(7): 44~51
郭延龙, 王淑云, 袁孝. 金刚石膜及类金刚石膜的光学应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(7): 44~51