文章编号 1674-2915(2009)06-0543-07

基于衍射光学元件的红外弱目标探测系统设计

吕银环,张 涛,童广辉,崔维鑫
(中国科学院 上海技术物理研究所,上海 200083)

摘要:根据非制冷焦平面阵列(FPA)探测器性能参数以及所需探测红外弱目标的大小与探测距离,计算并设置了系统参数,设计并研制了与之相匹配的长波红外光学系统,实现了对红外弱目标的探测。该红外光学系统基于6°×6°视场角,采用像方远心光路来实现。分析与计算结果表明,采用衍射非球面设计的由两片Ge镜片组成的红外弱目标探测光学系统具有重量轻、系统能量传输效率高和像质优良的优势。与三片球面Ge-AMTIR1-Ge红外光学系统相比,系统质量轻25%,能量传输效率高7%;与常规非球面Ge-Ge透镜系统相比,像质改善50%。比较结果显示,可见衍射非球面光学元件在红外弱目标探测系统中具有较好的应用前景。

关 键 词:长波红外光学系统;像方远心光路;衍射非球面
中图分类号:TN214; O436.1 **文献标识码**:A

Design of optical system based on diffraction optics for infrared weak target detection

LÜ Yin-huan, ZHANG Tao, TONG Guang-hui, CUI Wei-xin

(*Shanghai Institute of Technical Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 200083, *China*)

Abstract: A long wave infrared optical system was designed and developed by setting the system parameters based on the performance of a non-refrigeration focal-plane array(FPA) detector and by calculating the sizes and detection distances of an infrared weak target, and then the target detection for weak signals was realized successfully. This infrared optical system based a field of view in 6°×6° is implemented with the image space centrifugal path. Analysis and calculation results show that the optical system with two pieces of Ge-based diffraction optics has advantages of lower weight, higher energy transmission ability and good image quality. As compared with that of the three-piece spherical surface Ge-AMTIR1-Ge system, the weight of the system has lighted by 25% and the efficiency has improved by 7%. Moreover, the image quality has improved 50% than that of the traditional aspheric surface Ge-Ge method. These results show that the optical system has a wider application future in infrared weak target detection fields.

Key words: long wave infrared optical system; image space centrifugal path; diffraction aspheric surface

---

收稿日期:2009-07-23;**修订日期**:2009-09-24

1 引 言

红外光学探测系统是探测空间目标的重要技术手段。由于在空间运行的卫星表面温度长期处于很低的状态,多为红外弱目标,使用常规的红外探测方法很难实现对这类目标的有效探测,因此,开展红外弱目标探测新技术与新方法的研究很有意义且极具军事应用前景。在红外弱目标探测中,长波红外成像系统以其成熟的技术、优异的性能而引起人们的普遍关注。红外探测系统具有抗干扰能力强与环境适应性好等特点,采用红外焦平面探测器的新型跟踪测量系统,可以充分发挥红外成像探测的技术优势,实现全天时探测,跟踪与测量一定空间范围内、一定尺度的空间目标。同时红外探测系统可以提高系统的跟踪测量精度,减小其重量和功耗。而充分体现红外成像系统上述优势的关键在于红外光学系统的选型与设计的优良与否。

近年来,随着衍射光学元件加工工艺的日趋成熟,它已被引入到红外透镜和红外系统的应用中[1]。衍射光学元件独特的色散性质,可取代提供色差和非球面校正的常规双胶合透镜,实现成像光学系统二级光谱的校正[2],进而提高系统成像质量。

在红外弱目标探测系统中使用衍射非球面透镜设计长波红外光学系统既可降低红外光学系统的复杂性,还能减小系统体积及对制造容差的敏感性,并提高透镜的总性能,因此,其研究是当前红外弱目标探测的研究热点。本文基于三片球面 Ge-AMTIR1-Ge、非球面 Ge-Ge 和衍射非球面 Ge-Ge 设计了 3 种红外光学系统,实现了对红外弱目标的有效探测。

2 光学系统参数的计算

本文根据红外弱目标探测的需求,计算了所需红外光学系统的设计参数,并以此作为光学系统的设计依据。基于 320 pixel × 240 pixel 的面阵探测器计算了光学系统的焦距和视场。所采用探测器的每个像元大小为 30 μm × 30 μm,面阵几何尺寸为 9.6 mm × 7.2 mm,对角线长度为 12 mm。设红外弱目标尺寸为 1.5 m,根据目标典型温度范围、探测目标距离、目标尺度大小、探测器面阵结构和探测器光敏面像元尺寸对光学系统的入瞳直径进行了计算,得出了光学系统的瞬时视场、焦距、视场角、入瞳直径和 *F*#等主要参数,其结果如表 1 所示。

表 1 光学系统设计依据参数表

Tab. 1 Performance parameters for optical system design

探测距离	瞬时视场	总视场	焦距	入瞳直径(≥)	*F*#(≤)
1 ~ 5 km	0.3 mrad	6° × 6°	100 mm	56.82 mm	2.38

此外,考虑探测器焦平面的窗口为锗平板,厚度为 1.0 mm,后表面到焦平面的距离为 3.585 mm。本设计选取系统 *F*# = 1(满足 *F*# ≤ 2.38 的计算需求),而入瞳口径取为 100 mm(焦距为 100 mm),其它技术性能指标为波长 8 ~ 14 μm,全视场角 6° × 6°。

3 光学设计结果

根据光学系统参数的计算以及探测器的技术指标,本文设计了 3 种不同结构的光学系统:三片球面光学结构、两片非球面结构和两片衍射非球面结构,这 3 种结构均能满足系统需求。

(1)三片球面光学结构

由于锗材料和 AMTIR1 材料的折射率色散极小,两者搭配使用可降低色差,因此适于作为透镜材料。另外锗材料折射率很高(约为 4),有利于减小偏向角和校正像差。三片式球面结构采用锗材料作透镜,用“正-负-正”的结构方式,在满足系统的体积限制的同时,可使光学系统口径尽可能小,而其孔径光阑置于第一面位置。

三片球面结构设计如图 1 所示,其中球面 Ge

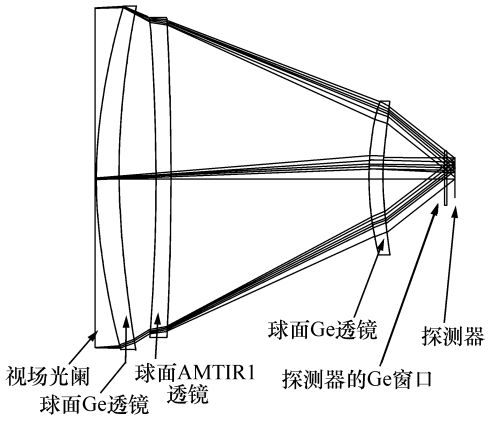


图 1　三片球面结构

Fig. 1　Optical configuration with three pieces of spherical surfaces

透镜的 3 个面均为球面。由于可供红外成像系统使用的材料相对较少,且通常都很昂贵,有的甚至还有毒性(如砷硒锗玻璃),容易危害加工和使用人员的健康[1],因此,三片球面结构选用了锗为透镜材料。锗单晶为金刚石结构,在红外波段有良好的透明性,其不溶于水,化学性质稳定,在透射波长范围内其折射率 $n \approx 4.0$,色散很小,透射波长为 1.8 ~ 25 μm,是一种优良的红外材料,广泛地用于制造红外透镜、窗口、棱镜等光学器件[3]。选用的另一透镜材料为 AMTIR1,属于砷硒锗玻璃,相对锗材料而言比较脆,镜片加工较锗材料困难些,而且其粉尘具有一定的毒性,加工成本较锗材料高。

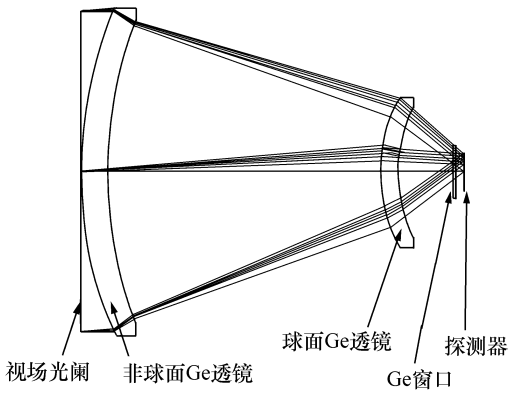


图 2　两片非球面全锗结构

Fig. 2　Optical configuration with two pieces of aspherical Ge lens

(2)两片非球面结构

采用两片非球面全锗结构比三片 Ge-AMTIR1-Ge 球面结构在系统重量和光学系统能量传输效率两方面上具有优势,可以使得系统重量降低 25%,效率提高 7% 左右,设计结果如图 2 所示,其中非球面 Ge 透镜的第二个面为非球面。该系统中的非球面 Ge 透镜为二次非球面透镜,加工难度较小,但与三片式球面系统相比较,只是改善了系统重量与光学效率,系统像质并未得到改善。

(3)两片衍射非球面结构

传统光学设计在校正轴向色差时必须采用不同色散的材料,因此红外成像系统的色差校正是光学设计的一个关键问题。通常通过引入衍射面,利用其独特的色散特性,可以更好地校正色差[4]。对红外成像系统而言,由于系统波长较长,衍射结构加工相对容易。与高次非球面加工相似,衍射面线间距、台阶数均可以用金刚石数控精密车削技术来实现[5],且对表面粗糙度有较宽松的容差,因此最适宜采用衍射光学元件。用两片衍射非球面全锗材料结构除可以实现更优的成像质量外,在系统体积、重量和光学系统效率方面也具有优势。此光学设计结果如图 3 所示,图中衍射非球面 Ge 透镜的第二个面为衍射非球面。

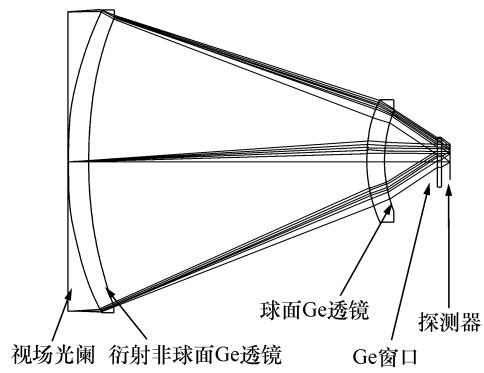
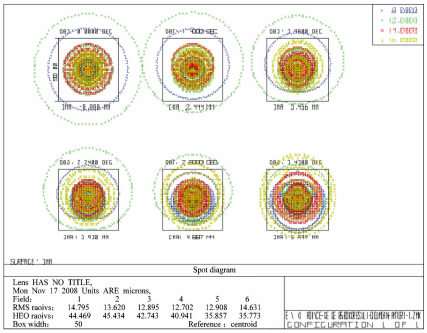


图 3　两片衍射非球面全锗结构

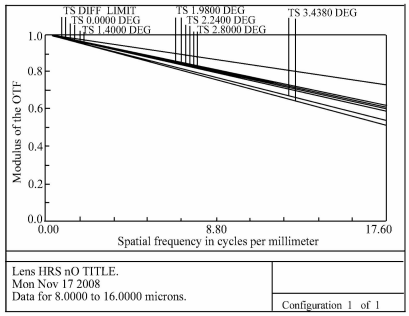
Fig. 3　Optical configuration with two pieces of diffractive aspherical Ge lenses

以上 3 种光学结构均为像方远心光路结构,即轴外主光线垂直于像平面,此类反远结构便于在像面之前放置滤光片和分束器等光学元件,可满足多种不同场合使用[6]。



(a) SPOT点列图

(a) SPOT figure

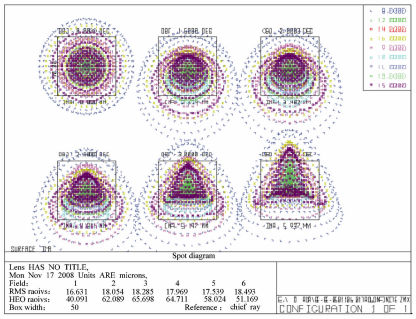


(b) MTF

(b) MTF

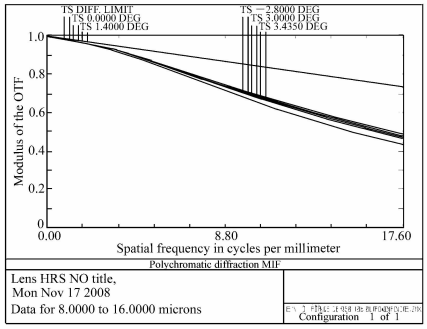
图 4 三片球面光学系统 SPOT 点列图与调制传递函数 MTF

Fig. 4 SPOT figure and MTF of optical system with three pieces of spherical surfaces



(a) SPOT点列图

(a) SPOT figure

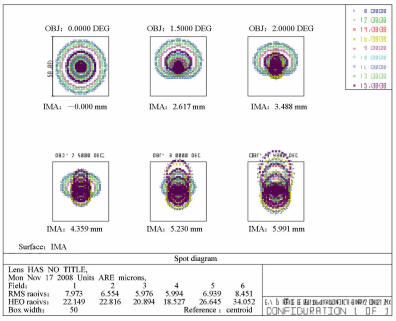


(b) MTF

(b) MTF

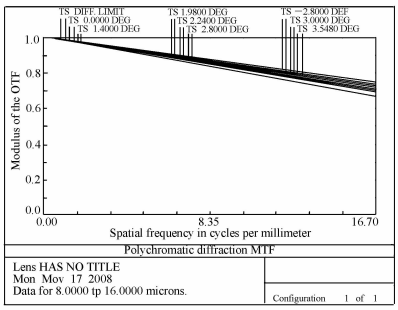
图 5 两片非球面光学系统

Fig. 5 Optical system with two pieces of aspherical surfaces



(a) SPOT点列图

(a) SPOT figure



(b) MTF

(b) MTF

图 6 两片衍射非球面光学系统

Fig. 6 Optical system with two pieces of diffractive aspherical surfaces

4　光学系统性能比较与分析

4.1　光学系统的成像质量

三片式 Ge-AMTIR1-Ge 光学系统的像质以光学系统追迹出的系统弥散斑 SPOT 点列图与系统 MTF 表示结果如图 4 所示。

两片非球面全锗透镜设计的像质结果如图 5 所示。与图 4 中成像质量相比对,虽然两片非球面全锗结构具有系统重量轻与光学系统效率高等优势,但由于色差不好消除,其像质不如三片球面的 Ge 与 AMTIR1 相结合所构成的消色差光学系统。

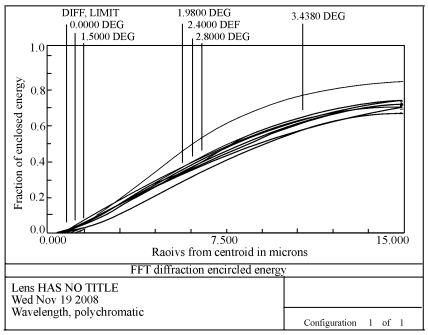
一般透镜成像依据的是折射理论,即在特定波长 λ 的焦距与对应材料的折射率 $n(\lambda)$ 有关,而衍射光学元件是一种多阶相位透镜,其焦距仅与其表面微结构的变化和波长 λ 有关,与材料折射率无关[7]。衍射光学元件与折射光学元件结合使用不但可以减小系统的体积和重量,而且可提供更多校正像差的自由度。因此,由衍射非球面全锗透镜组成的光学系统成像质量优良,其 SPOT 点列图与系统 MTF 如图 6 所示。

4.2　光学系统的能量传输效率

三片结构球面光学系统的光学透过率约为 15.7%,两片结构非球面光学系统的光学透过率为 22.1%。若光学系统采用镀增透膜的锗透镜和 AMTIRI 透镜,则可以使三片结构的球面光学系统光学透过率达 0.65,两片结构的非球面光学系统光学透过率达 0.72。

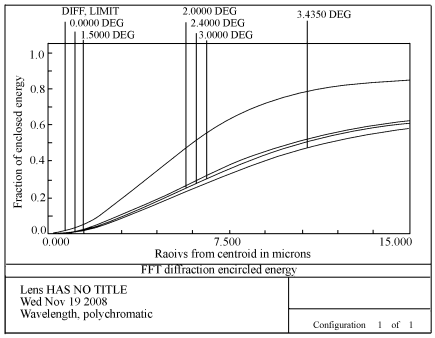
由图 7 可以得出,截至 15 μm RMS 半径,三片球面结构光学系统的含能系数为 0.707 0,衍射极限为 0.848 6(图 7a),两片非球面结构光学系统的含能系数为 0.623 6(图 7b),两片衍射非球面结构光学系统的含能系数为 0.790 8(图 7c),第三种结构的含能系数最接近衍射极限。

3 种光学系统相比,三片球面结构相对于两片非球面结构的光学系统优点在于光学系统性能较好,缺点在于能量传递效率较低,系统重量较大,材料成本较高。两片结构非球面光学系统的优点在于能量传递效率高,但其系统成像性能相对差一些,使用衍射非球面则可以大大提高光学系统的成像质量与系统效率。



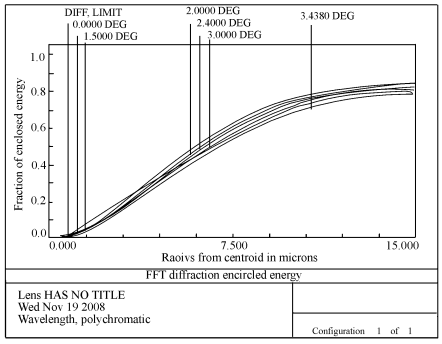
(a) 三片球面光学系统

(a) Optical system with three pieces of spherical surfaces



(b) 两片非球面光学系统

(b) Optical system with two pieces of aspherical surfaces



(c) 两片衍射非球面光学系统

(c) Optical system with two pieces of diffractive aspherical surfaces

图 7　光学系统能量包含系数

Fig. 7　Energy coefficients of optical system

$f=100$ mm,$F\#=1$ 的红外光学系统详细光学设计比对结果如表 2 所示。

表2 3种光学系统设计结果比对表

Tab.2 Comparison of three types optical systems

系统参数	设计结构		三片球面结构	两片非球面结构	两片衍射非球面结构
几何参数	系统总长(mm)		147.678	168.385	143.5
	系统外径(mm)		106	106	106
	系统重量(g)		629	413	377
	光栏位置(surface)		1	1	1
性能参数	弥散斑 RMS 半径(μm)	衍射极限	34.18	34.10	34.16
		0 视场	29.6	32.3	16.4
		0.7 视场	25.4	36	11.6
		1 视场	27.3	37	16.32
	MTF(16.7 line/mm)	衍射极限	0.741 58	0.747 85	0.747 48
		0 视场	0.606 15	0.510 08	0.724 06
		0.7 视场	0.630 92	0.504 48	0.724 14
		1 视场	0.569 19	0.507 01	0.700 39
	能量系数		0.707 0	0.623 6	0.790 8
	光学效率		0.65	0.72	0.72

5 结 论

本文对3类红外弱目标光学系统进行了分析。结果表明,采用衍射非球面设计的由两片Ge镜片组成的红外弱目标探测光学系统具有重量轻、系统传能效率高和像质优良的优势。与三片球面Ge-AMTIR1-Ge红外光学系统相比,系统质量轻25%,传能效率高7%;与常规非球面Ge-Ge透镜系统相比,像质改善50%。比较结果显示,可见衍射非球面光学元件在红外弱目标探测系统中具有较好的应用前景。尤其是针对长波红外光学系统可用的材料品种少,消除色差困难,价格昂贵等特点,衍射光学元件在长波红外系统中的应用更具优势。

参考文献:

[1] 焦明印.衍射光学元件在红外成像系统中的应用[J].应用光学,2000,21(6):17-20.
JIAO M Y. The application of diffractive optical elements used in infrared imaging system[J]. *J. Appl. Optics*,2000,21(6):17-20. (in Chinese)

[2] 张志坚.红外光学材料的现状与发展[J].云南冶金,2000,29(5):35-40.
ZHANG ZH J. Status quo and development of infrared optical materials[J]. *Yunnan Metallurgy*,2000,29(5):35-40. (in Chinese)

[3] 欧旭锋,舒朝濂.衍射元件在大相对孔径红外镜头中的应用[J].西安工业学院学报,2006,26(1):13-16.
OU X F,SHU ZH L. Application of diffractive optical elements used in high relative aperture infrared lenses[J]. *J. Xi'an Technical Institute*,2006,26,(1):13-16. (in Chinese)

[4] 赵丽萍,邬敏贤,金国藩,等.折衍混合单透镜的色球差校正研究[J].光学学报,1998,18(5):621-626.
ZHAO L P,WU M X,JIN G F,*et al.*. Spherochromatism correction of a hybrid refractive diffractive singlet[J]. *Acta Optica Sinica*,1998,18(5):621-626. (in Chinese)

[5] 李荣刚,张兴德,贺谊亮.用于大相对孔径红外镜头的衍射光学元件[J].激光与红外,2004,34(6):464-466.
LI R G,ZHANG X D,HE Y L. Diffractive optical elements used in high relative aperture infrared lenses[J]. *Laser & Infrared*,2004,34(6):464-466. (in Chinese)

[6] 沈为民,薛鸣球,余建军. 大视场大相对孔径长波红外物镜[J]. 光子学报,2004,33(4):460-462.
SHEN W M,XUE M Q,YU J J. Long wave infrared fast objective with wide field of view[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(4):460-462. (in Chinese)

[7] 吕银环,王汝笠,柴震海,等. 基于衍射光学元件色散特征的三维建模系统[J]. 光子学报,2004,33(9):1145-1147.
LÜ Y H,WANG R L,CAI ZH H,*et al*.. 3-Dimensional modeling system based on the chromatic dispersion characteristic of diffractive optical element[J]. *Acta Photonica Sinica*,2004,33(9):1144-1147. (in Chinese)

作者简介:吕银环(1974—),女,河南人,博士,主要从事空间成像技术与红外光学设计方面的研究。
E-mail:lvyh2001@ yahoo. com. cn

向您推荐《**液晶与显示**》期刊

- 中国最早创办的液晶学科专业期刊
- 中国惟一的液晶学科和显示技术领域中综合性学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊,中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(РЖ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、"中国科技论文统计源期刊"等 20 余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊
- 中文核心期刊,影响因子为 1.156

《液晶与显示》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报和综合评述等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域中最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价 30.00 元。国内邮发代号:12 - 203;国外发行代号:4868BM。

地 址:长春市东南湖大路 3888 号　　国内统一刊号:CN 22-1259/O4
《液晶与显示》编辑部　　国际标准刊号:ISSN 1007-2780
邮 编:130033　　电　　话:(0431)6176059
E-mail:yjxs@ ciomp. ac. cn　　网　　址:www. yejingyuxianshi. org