

文章编号 1004-924X(2002)04-0329-04

长波红外广角地平仪镜头的光学设计

沈为民, 薛鸣球, 余建军

(苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要:介绍适用于非致凝视式焦平面阵列的长波红外(LWIR)广角地平仪镜头的光学设计。其工作波长范围 $10\sim 16\mu\text{m}$,全视场角为 135° 。采用“负-正-正”型的反远距像方远心光路镜头结构,仅有三块非球面透镜构成。能够很好地解决广角镜头轴外像差校正和像面照度均匀性问题。此镜头结构简单、体积很小、后工作距离大,成像质量接近于衍射极限,在 20lp/mm 空间频率处的调制传递函数值超过 0.6 ,像高与视场角关系偏离线性的相对误差不超过 15% 。文中还分析了此镜头的加工和装调公差。

关键词:地平仪;长波红外;广角镜头;光学设计;非球面

中图分类号:TH741 **文献标识码:**A

1 引言

安装在航天器上的地平仪通过探测地球的红外辐射,测量和控制航天器在空间的姿态。传统扫描式地平仪采用机电扫描反射镜和单元探测器,新一代凝视式地平仪^[1,5,6]使用非致冷微测辐射热计探测器(Microbolometer),不需要高精度的机电扫描装置,因而体积、重量、造价、可靠性等方面优点明显。另外,通过偏置视场,可获得航天器的侧滚、俯仰和偏航信息,不必借助陀螺仪测量偏航角。而且,这种凝视式地平仪获得的地球红外辐射图像信息量大,可用来提高航天器的姿态测控精度。

光学系统的成像质量直接影响测量精度,凝视式地平仪的光学系统不同于扫描式地平仪,后者只要求对瞬时小视场成像,通过机电扫描获得地球图像,而前者则需将整个地球成像在焦平面阵列上,要求光学系统在大视场内具有好的像质。本文介绍适用于凝视式地平仪的光学系统设计。首先,给出其技术性能指标和设计思想;然后,给出设计结果、像质评价和公差分析结果。

2 指标要求和设计思想

地球对宇宙空间的红外辐射主要集中在远红外波段,凝视式地平仪光学系统将地球的红外辐射图像成像在焦平面阵列探测器上。根据大气层外的地球红外辐射谱和探测器的光谱响应,选择工作波长范围为 $10\sim 16\mu\text{m}$ 长波红外波段。为摄取整个地球的图像,光学镜头全视场角 2θ 、地球半径 R 和航天器轨道高度 H 应满足:

$$2\theta = 2 \times \sin^{-1} \left(\frac{R}{R+H} \right)$$

表明轨道越低,视场角要求越大。例如,当轨道高度 800km 时,取地球半径 6350km ,则全视场角应大于 125.3° 。为了获得偏航信号,还需考虑引入视场角偏置,在本文设计中选择全视场角 135° 。

传统地,摄远物镜的主要指标包括焦距 f 和 $F/\#$,它们的选取与探测器的类型、性能参数有关。典型的微测辐射热计探测器的像元数有 240×320 个,像元尺寸在 $30\sim 50\mu\text{m}$ 之间。当像元尺寸为 $50\mu\text{m}$ 时,考虑到地球的圆形形状,实际有用的像面尺寸为 12.2mm ,即要求边缘视场的像

高等于 6.1mm。对于无畸变镜头,焦距 f 由半视场角 θ 和像高 Y 确定

$$f = \frac{Y}{\tan \theta}$$

然而,对于广角镜头,通常存在很大的畸变^[3],在实际设计过程中,常将视场角和像高设为定值,允许焦距随系统优化变量改变。

光学镜头的 $F/\#$ 影响光学系统的通光能力、传递特性和像差校正的难易。非致冷微测辐射热计探测器各像元间的热串扰很小,具有接近理论极限的传递特性,但其检测率较低,典型值约为 $1 \times 10^{-8} (\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W})$,并且考虑到红外光学材料在上述工作波段内的吸收, $F/\#$ 应尽可能小。从探测器的几何线度来看,为了充分发挥探测器的分辨能力,像平面内的瑞利距离 d 应小于像元大小,即

$$d = 1.22 \lambda \times F/\# < a$$

式中 λ 和 a 分别是辐射波长和像元尺寸。当像元尺寸和波长分别为 $30\mu\text{m}$ 和 $16\mu\text{m}$ 时,要求 $F/\#$ 小于 1.5。从光学传递函数(MTF)的角度来看,为了保证最终获得的数字图像具有足够好的像质,通常要求光学系统在探测器奈奎斯特频率处的 MTF 值大于 0.5,相当于探测器的奈奎斯特频率 f_N 应小于衍射受限光学系统截止频率的 0.4 倍,即

$$f_N < 0.4 \times \frac{1}{\lambda \times F/\#}$$

同样可得, $F/\#$ 应小于 1.5。然而,光学镜头的 $F/\#$ 越小,像差校正难度越大。随着非球面加工技术的日渐成熟,合理使用非球面可有效地校正大视场、大相对孔径系统的像差,使其成像性能接近衍射极限。

另外,微测辐射热计探测器不用液氮致冷,不需要冷却光栏,孔径光栏可置于光学系统内任意位置。光学镜头也不必非热化,采用主动式调焦便可解决热补偿问题。

根据以上分析,选用锗(Ge)作为透镜材料^[4],在 $10 \sim 16\mu\text{m}$ 波长范围内,具有良好的透射特性,在波长 10、13、 $16\mu\text{m}$ 处的折射率分别为 4.0041、4.00228、4.00086,大大高于传统光玻璃的折射率,有利于校正初、高级像差。而且在上述长波红外波段范围内,折射率随波长的变化很小,对于焦距较短的广角镜头,色差对像质的影响可忽而不计。

为了便于安装带通滤光器,镜头必须有足够的

后工作距离。采用如图 1 所示的“负-正-正”反远距结构,其优点是透镜 1、3、4 的偏角负担较轻,有利于像差校正。孔径光栏 2 位于中间正透镜 3 的前表面,也恰好位于正透镜 4 的前焦面附近,形成像方远心光路,有利于确保整个像面上的照度均匀性。

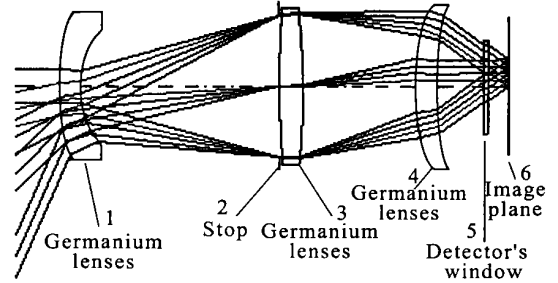


图 1 光学系统

Fig. 1 Optical system.

该光学系统有两个间距、六个曲率半径,共八个可变参数,考虑到像高和像方远心要求,还剩下六个自由参数,由于不必考虑色差,原则上,足用来校正初级像差。但,为使光学系统性能接近衍射极限, $F/\#$ 尽可能小及结构尽量紧凑,3 块透镜均采用一个非球面,负透镜 1 和正透镜 4 的后表面分别用二次圆锥曲面和高次非球面,以校正彗差、像散等轴外初、高级像差,及控制畸变量。正透镜 3 的前表面也用高次非球面,校正初级和高级轴上像差。下面给出的优化设计和评价结果表明上述设计思想是行之有效的。

3 设计结果与性能分析

根据以上选定的光学结构形式和指标要求,首先由高斯光学和初级像差理论,确定光学系统的初始结构;然后,设置边界条件,在 CODE V 程序上进行优化和像质评价。表 1 列出了优化得到的光学系统参数。

表 1 光学系统参数

Table 1 Parameters of the optical system

波长范围	10 ~ 16 μm
全视场	135°
像高	6.1mm
焦距	6.4mm
入瞳口径	7.54mm
光学长度	95mm
光学外径	36.6mm
工作距离	15.4mm
重量	约 70g

进一步,借助 CODE V 程序,对设计结果进行像质评价。图 2 是半视场内五个匀排视场的径向能量集中度分布曲线,横坐标是像斑直径,纵坐标是能量集中度。可见 100% 的能量集中在直径小于 $45\mu\text{m}$ 的圆内,而 80% 的能量集中在直径小于 $22\mu\text{m}$ 的圆内。

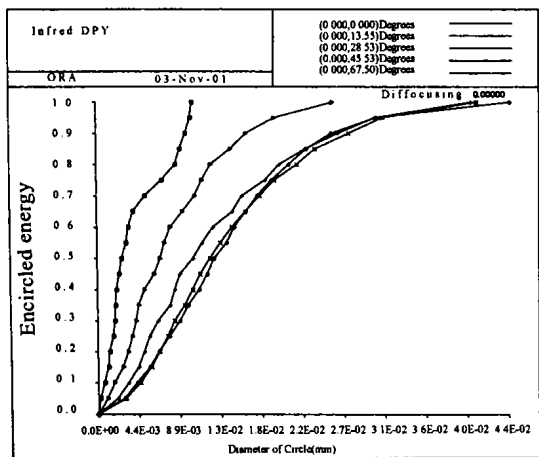


图 2 径向能量分布曲线
Fig. 2 Radial energy distribution.

图 3 是光学系统的调制传递函数 (MTF) 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调制传递函数值。可见镜头的成像性能接近于理论极限,在 20lp/mm 空间频率处,边缘视场的 MTF 值最小,等于 0.601。表明该镜头可适用于像素尺寸大于 $25\mu\text{m}$ 的面阵探测器。用此软件对半视场内五个匀排视场的照度分析表明,其均匀性好于 1%。

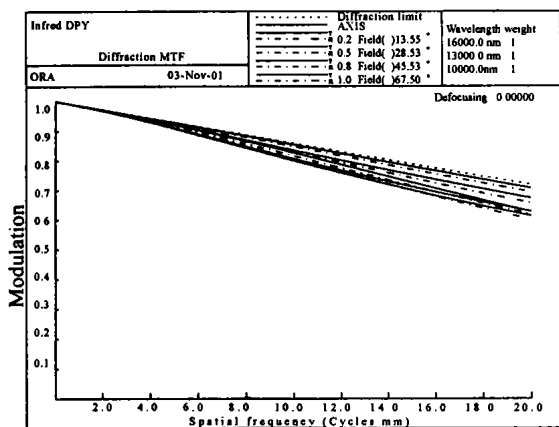


图 3 调制传递函数曲线
Fig. 3 MTF vs spatial frequency at the image plane.

图 4 给出了畸变随实际像高的变化曲线。在边缘视场处,畸变达到最大,为 -60.5%。该镜头通过引入负畸变,使像高与视场角之间具有线性关系。如图 5 是像高与视场角的关系曲线,横坐标为视场角,分度值为 6.75° ,纵坐标为像高,单位是 mm,像高随视场变化偏离线性的相对误差小于 15%。

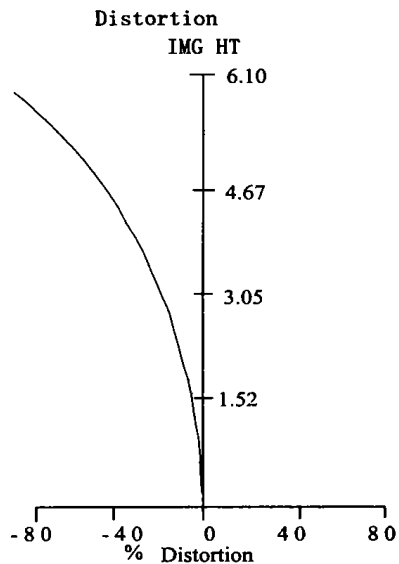


图 4 畸变随像高的变化曲线
Fig. 4 Distortion vs image height.

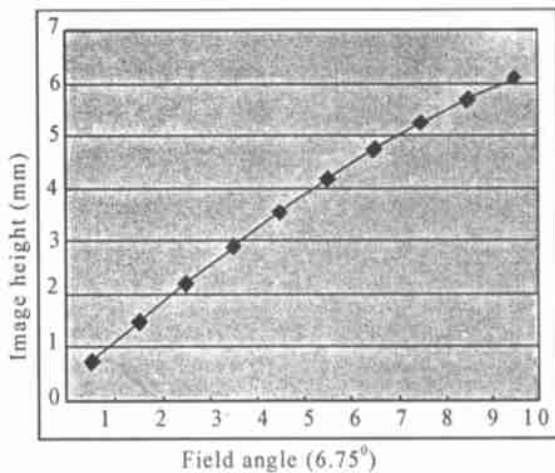


图 5 $F -$ 关系曲线
Fig. 5 $F -$ relation.

为了衡量该光学系统的可实现性,利用 CODE V 程序的交互式公差制订工具,对设计结果进行公差分析,结果如表 2 所示,在这样的公差下,MTF 下降值小于 0.15 的概率为 97.7%。符合目前的加工和装调工艺。

表 2 公差分析结果
Table 2 Results of tolerance analysis

透镜同轴度	0.01 mm	表面半径	r/200
透镜倾斜度	1 arc min	二次系数	0.008
透镜间距	0.03 mm	透镜厚度	0.1 mm
像面位置	0.005 mm	折射率	0.002
透镜偏心	0.01 mm	材料非均匀性	1.0E-4

系统的设计思想、设计结果、像质评价和公差分析。表明利用非球面能有效地获得高性能的长波红外广角镜头,具有结构简单紧凑、后工作距离大、像面照度均匀、 F 线性好等特点。该镜头可与非致冷微测辐射热计探测器相配,构成新一代地平仪,获取航天器的三轴姿态信息。

4 结 论

以上给出了凝视式长波红外广角地平仪光学

参考文献:

- [1] Krigbaum W G, Lee S J, Okamoto A Y. Microbolometer earth sensor assembly[P]. U. S. Patent :6026337,2000 - 02 - 15.
- [2] Marshall C A. Uncooled infrared sensors with digital focal plane array[J]. *SPIE*, 1996, 2746:23 - 31.
- [3] Dekker M. *Lens Design* [M]. 3rd Ed. Milton Laikin, USA: 2000. 105 - 120.
- [4] Potter R F. Germanium (Ge). in *Handbook of Optical Constants of Solids*[M]. Ed. by E. D. Palik Academic Press. 1985. 469 - 478.
- [5] 杨继全,侯丽雅,章维一. 台式快速成型装置的光学系统研究与开发[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(2):127 - 130.
- [6] 常军,翁志成,姜会林,等. 长焦距空间三反光学系统的设计[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(4):315 - 318.

Optical design of a wide-angle lens for long-wave infrared earth sensors

SHEN Wei-min, XUE Ming-qiu, YU Jian-jun

(*Institute of Modern Optical Technology, Suzhou University, Suzhou 215006, China*)

Abstract: This article describes the optical design of a wide-angle lens suitable for long-wave infrared (LWIR) earth sensor whose operating wavelength range is 10 to 16 microns, and full angle of view is up to 135 degrees, having an uncooled staring focal plane array. The optical system only consists of three germanium lenses with a "negative-positive-positive" reversed telephoto telecentric structure in the image space. This type of wide-angle lens can balance the correctness of off-axis aberrations against the evenness of illumination at its image plane very well. The designed lens has the advantages of simplicity, compactness and long back working distance. Its imaging quality is nearly diffraction limited, so that its modulated transfer function (MTF) value is higher than 0.6 at the 20 lines/mm spatial frequency in the image plane, and the relative error of the linearity between its image height and field angle is lower than 15%. Its manufacture and alignment tolerance are also analyzed with the CODE V optical design software.

Key words: earth sensor; long-wave infrared (LWIR); wide-angle lens; optical design; aspheric surface

作者简介:沈为民(1963-),男,江苏苏州人,副研究员,1984年毕业于苏州大学物理系,同年留校于信息光学工程研究所工作,1995年获得光学专业硕士学位,目前,是中国科学院应用光学专业的博士研究生,已发表学术论文二十余篇。