

文章编号 1004-924X(2010)06-1243-06

广角 $f-\theta$ 静态红外地平仪镜头的光学设计

刘英^{1,2}, 王靖³, 曲锋^{1,2}, 孙强¹, 卢振武¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 第二炮兵工程设计研究院, 北京 100011)

摘要: 为了满足航天器对轻小、价廉, 性能可靠的自主导航系统的要求, 设计了广角静态红外地平仪系统。该系统选择辐射稳定的 $14\sim 16.25\ \mu\text{m}$ 作为工作波段, 并设定全视场角为 136° , F 数为 0.61; 采用反远距结构, 使系统后工作距达到 15 mm; 利用 $f-\theta$ 镜头设计原理, 并合理地选用非球面对广角系统进行优化设计, 使系统的线性特性的相对误差 $< 0.5\%$; 在空间频率为 15 lp/mm 处, 系统的调制传递函数 > 0.6 , 接近衍射极限; 在半径为 $20\ \mu\text{m}$ 的圆内, 系统径向能量 $> 85\%$ 。另外, 采用了像方远心光路, 提高了像面的照度均匀性, 实现了整个像面照度均匀性 $> 99\%$ 。设计结果表明, 该镜头结构简单、体积小、后工作距大, 很好地解决了广角镜头轴外像差平衡问题, 实现了地平仪系统的高精度设计。

关键词: 红外地平仪; 反远距结构; 广角 $f-\theta$ 镜头; 光学设计

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101806.1243

Optical design of high precision wide-angle lens for static infrared earth sensors

LIU Ying^{1,2}, WANG Jing³, QU Feng^{1,2}, SUN Qiang¹, LU Zhen-wu¹

- (1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
3. *Engineering Design & Research Institute of the Second Artillery, Beijing 100011, China*)

Abstract: In order to meet the requirements of spacecrafts for autonomous navigation systems with light small, cheap and reliable performance, a wide-angle static infrared horizontal system was designed. The system chose the operating wavelength range of 14 to $16.25\ \mu\text{m}$ to keep a stable radiation, and its full field of view was set as 136° and F number as 0.61. By using a retrofocus structure in image space, the back working distance has been 15 mm in the optical system. On the basis of the design principle of a $f-\theta$ lens, the aspheric surface was used to rationally optimize the wide-angle system, then the related error of linear characteristics of the $f-\theta$ lens is less than 0.5% , and the modulated transfer function is higher than 0.6 at 15 lp/mm in the image plane (approaches diffraction limit). In a circle with radius of $20\ \mu\text{m}$, the radial energy is higher than 85% . Furthermore, a telecentric optical path was used in the system, which improves the relative illumination to more than 99% . These re-

收稿日期: 2009-04-02; **修订日期:** 2009-06-02.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA122110); 国家自然科学基金资助项目 (No. 60507003); 吉林省科技发展计划杰出青年资助项目; 国家自然科学基金资助项目 (No. 60977001)

sults show that the designed lens has the advantages of simplicity, compactness and long back working distance, and can balance the correctness of off-axis aberrations.

Key words: infrared earth sensor; retrofocus structure; wide-angle $f\theta$ lens; optical design

1 引言

航天器自主导航技术可以实现航天器不依赖于地面支持系统的自主运行,它不但可以有效地降低地面支持成本,降低航天计划的费用,而且可提高航天器的生存能力,即使在地面系统遭受破坏和敌方人为干扰情况下,仍能实现卫星的轨道确定和轨道保持功能,这一点对军用航天器尤为重要。另外,卫星的发展趋向于微型化,也十分需要小型、廉价、可靠并满足任务要求的自主导航系统。

安装在航天器上的地平仪通过探测地球的红外辐射来测量和控制航天器的空间姿态。传统的扫描式地平仪多采用机电扫描反射镜和单元探测器来完成,因此需要高精度的机电扫描装置;而使用非制冷微测辐射热计探测器的凝视型红外地平仪^[1-5]不需要高精度的机电扫描装置,因此使其在体积、重量、造价及可靠性等方面更具优越性,尤其是透射式结构。这种凝视型静态红外地平仪系统,通过偏置视场,可以获得航天器的侧滚、俯仰和偏航信息,而且获得的地球红外辐射图像的信息量大,进一步提高了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,凝视型地平仪的光学系统不同于扫描型地平仪,它需要将整个地球成像在焦平面阵列上,故要求光学系统在大视场内具有很好的成像质量。本文利用反远距结构,设计了静态红外地平仪,使地平仪系统具有足够大的后工作距(约为 15 mm);应用 $f\theta$ 镜头的设计原理^[6-8]并合理使用非球面^[9-11],使得广角 $f\theta$ 镜头线性特性的相对误差值不超过 0.5%,系统在 15 lp/mm 处的光学传递函数(MTF) >0.6 ,在半径为 20 μm 的圆内,径向能量高于 85%;采用像方远心光路,使整个像面的照度均匀性好于 1%。

2 指标要求和设计思想

地球对宇宙空间的红外辐射主要来自各层大气,综合考虑减少地表和对流层辐射强度变化的干扰,并排除 715~725 cm^{-1} 臭氧敏感波段,将面阵焦平面静态红外地平仪使用的工作波段设定为 14~16.25 μm ,并取 $\lambda_c = 15 \mu\text{m}$ 为系统设计的中心波长。为了摄取整个地平圆的图像,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:

$$2\theta \geq 2 \times \arcsin\left(\frac{R}{R+H}\right), \quad (1)$$

式(1)表明轨道越低,视场角要求越大。本文选取轨道高度为 700 km,地球半径为 6 350 km,则全视场角应大于 128.5°。为了获得偏航信号,还需要引入视场角偏置,本文选取全视场角为 136°。

为了平衡广角透射式光学系统中大视场像差彗差、像散和畸变三者之间的矛盾,通常采用 $f\theta$ 镜头原理,即像高 y' 和视场角 θ 呈线性关系:

$$y' = f'\theta, \quad (2)$$

其中 f' 为光学系统的焦距。在一般的光学系统中,像高 y' 和视场角 θ 呈非线性关系,即理想像高为 $y' = f' \tan \theta$,因此 $f\theta$ 镜头会产生一定量的桶形畸变,即: $\delta y' = f'\theta - f' \tan \theta = f'(\theta - \tan \theta)$ 。

如果把 θ 对应的实际像高记为 $H(\theta)$,则有:

$$q = \frac{H(\theta) - f'\theta}{f'\theta}, \quad (3)$$

通常把 q 称为 $f\theta$ 线性特性,即像高随视场变化线性偏离的相对误差值。为了保证记录信息不失真以及后续图像处理的准确性,一般要求 $f\theta$ 线性特性不超过 0.7%。

光学系统的像高 y' , 焦距 f' 和 F 数 ($F/\#$) 与探测器的类型和性能参数有关。典型的非制冷微测辐射热计的像元数为 320×240,像元尺寸为 $a = 50 \mu\text{m}$,考虑到地平圆的像为圆形,则实际有用的像面尺寸为 $\phi = 12 \text{ mm}$,即像高 y' 为 6 mm,

$f\theta$ 镜头的焦距为 $f' = 4.9$ mm。

从 MTF 的角度来看,探测器的乃奎斯特频率 f_N 应小于衍射受限光学系统截止频率的 0.4 倍,即:

$$f_N = \frac{1}{2a} = 10 \text{ lp/mm} \leq 0.4 \times \frac{1}{\lambda_c \cdot F/\#}, \quad (4)$$

由式(4)可知,光学系统的 F 数应小于 2.7。然而, F 数越小,像差校正越困难。为了保证像面上可以获得足够的光通量,本文选取入瞳直径为 8 mm,则 F 数为 0.61。

根据以上分析,选用锗(Ge)作为透镜材料。Ge 在 14~16.25 μm 有良好的透射特性,在波长 14, 15, 16.25 μm 处折射率分别为 4.001 772, 4.001 304, 4.000 752, 大大高于传统光学玻璃的折射率,有利于校正初、高级像差。而且在工作波段范围内 Ge 材料的折射率随波长变化很小,对于焦距较短的广角镜头,色差对系统像质的影响可忽略不计。

3 反远距结构

由于光学系统的焦距很短,为了便于安装带通滤波片,镜头必须有足够的后工作距。为此,在光学系统设计时,采用“负光组-正光组”构成的反远距结构,如图 1 所示。 f' 为像方焦距, l' 为后工作距,且 $l' > f'$ 。负光组靠近物空间,称为前组;正光组靠近像平面,称为后组。

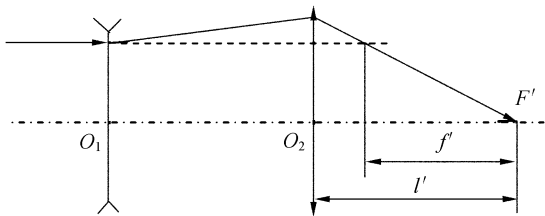


图 1 反远距结构

Fig. 1 Retrofocus structure

反远距结构的光阑常常设在后组,所以前组远离光阑轴外光束有较大的入射高度,产生了较大的初级轴外像差和高级轴外像差,轴外像差力求由前组本身解决,剩余量可由后组补偿。后组承担较大的孔径,其视场由于前组的发散作用已有所减小,相当于对近距离成像,在成像关系上处

于更对称的位置,但是考虑到前组剩余的像差,尤其是垂轴像差彗差 S_{II} 、像散 S_{III} 和畸变 S_V ,后组采用三片式或匹兹万结构更为合理。

无出瞳像差和渐晕时,像面边缘照度 E' 与中心照度 E_0' 的关系式:

$$E' = E_0' \cos^4 \theta', \quad (5)$$

可见轴外像点的光照度随视场角余弦的四次方而降低,减小 θ' 可以极大地提高轴外像面的光照度。因此,适当的调整反远距结构,可提高像面照度的均匀性。

如果光学系统的后组包含像方远心光路,即 $\theta' = 0$,则 $E' = E_0'$,整个像面的照度是均匀的。

但是对于广角系统,为了得到较好的轴外像质,使边缘视场出现适当的渐晕,则式(5)变为:

$$E_{\theta'}' = V_{\theta} E_0' \cos^4 \theta', \quad (6)$$

其中, V_{θ} 为光学系统的渐晕系数。

定义像面上照度的均匀度为:

$$K_{\theta'}' = \frac{E_{\theta'}'}{E_0'} = V_{\theta} \cos^4 \theta'. \quad (7)$$

因此,要实现像面照度的均匀性,还必须合理地控制系统的渐晕。

4 设计结果与性能分析

通过上述理论分析,采用如图 2 所示反远距结构,前组由一片负透镜组成,后组由透镜 2、3、4 组成。孔径光阑位于正透镜 4 的前焦平面附近,使系统形成像方远心光路,以确保整个像平面上照度的均匀性。

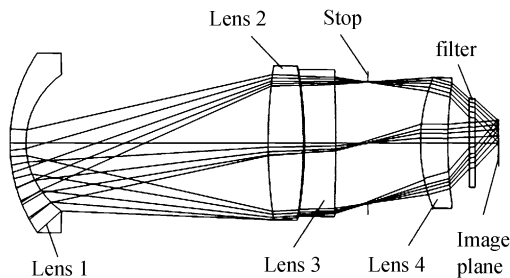


图 2 光学系统

Fig. 2 Optical system

由于 Ge 材料在工作波段范围内色散很小,不必考虑色差。图 2 中,透镜 3 离光阑较近,轴上光线在透镜 3 上的高度最大,透镜 3 对球差和彗差的变化很敏感,因此,在透镜 3 的前表面加高次

非球面对系统进行球差和彗差校正。主光线在远离光阑的负透镜 1 和正透镜 4 上具有最高的入射高度,使得透镜 1,4 对系统的彗差,像散和畸变影响最大,因此,在透镜 1 的后表面和透镜 4 的前表面加高次非球面对大视场像差进行校正。考虑到技术水平的限制和生产成本的要求,系统中使用的均为旋转对称的,高次项系数不高于 6 次的非球面。

通过对光学系统的优化设计^[9-10],最终得到的光学系统的结构参数如表 1 所示。

表 1 光学系统参数

Tab.1 Parameters of optical system

Wavelength/ μm	14~16.25
Field	$\pm 68^\circ$
Entrance pupil diameter/mm	8
$F/\#$	0.61
Effective focal length/mm	4.88
Back working distance/mm	15
Optical material	Ge
Total length/mm	120
Weight/g	100

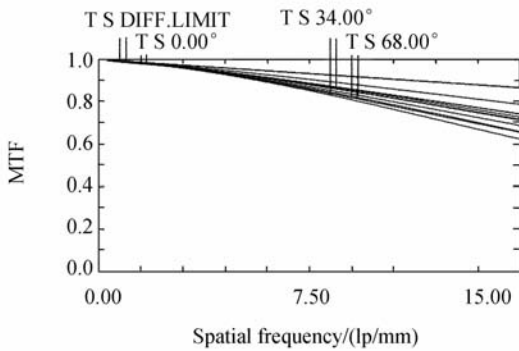


图 3 调制传递函数曲线

Fig. 3 MTF vs. spatial frequency at image plane

图 3 是光学系统的调制传递函数 (MTF) 曲线图,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。从图中可以看到系统在 15 lp/mm 空间频率处,边缘视场的 MTF 值最小,为 0.625,表明系统设计接近衍射极限,满足成像要求。

图 4 是各个视场的径向能量集中度分布曲线,横坐标是像斑半径,纵坐标是能量集中度。由图可见 80% 的能量集中在半径 $< 17 \mu\text{m}$ 的圆内。

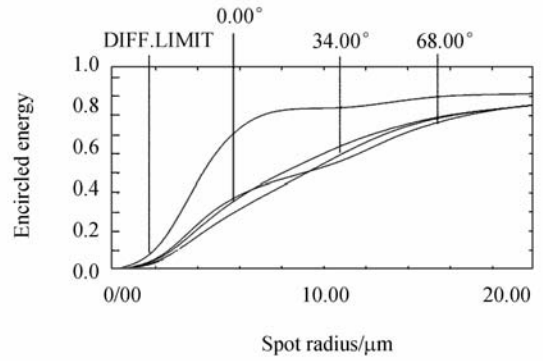


图 4 径向能量分布曲线

Fig. 4 Radial energy distribution

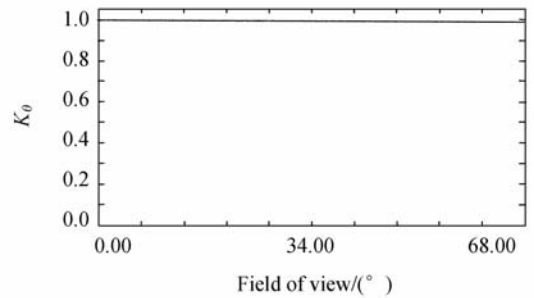


图 5 像面上的照度均匀度曲线

Fig. 5 Relative illumination vs. field of view at image plane

图 5 是像面上的照度均匀度曲线,横坐标是视场角,纵坐标是像面上的相对照度。照度均匀度在 ZEMAX 中定义为像面上各个视场的照度 E_θ' 与像面上最大照度 E_{\max}' 之比,即 $K_\theta' \leq 1$ 。由于光学系统包含像方远心光路,存在轴上、轴外像差的平衡和光瞳像差,考虑到渐晕、有效 F 数和入射角度变化的影响,像面照度的均匀度不能用式 (7) 简单表示,因此,像面上照度的最大值不一定在零视场位置。从图可见像面上最大照度出现在中间视场附近,即 $E_{34}'/E_{\max}' = 1$,最小照度出现在边缘视场的约为 $E_{68}'/E_{\max}' = 0.992$,则 $0.992 \leq K_\theta' \leq 1$ 。因此,像面上可以获得很好的照度均匀性。

图 6 是 $f-\theta$ 系统的线性特性曲线,横坐标是 $f-\theta$ 系统的校准畸变值,即 p 值,纵坐标是视场角;可见光学系统的 $f-\theta$ 线性特性 p 最大约为 0.5%。图 7 是视场角与像高的对应关系,可见视

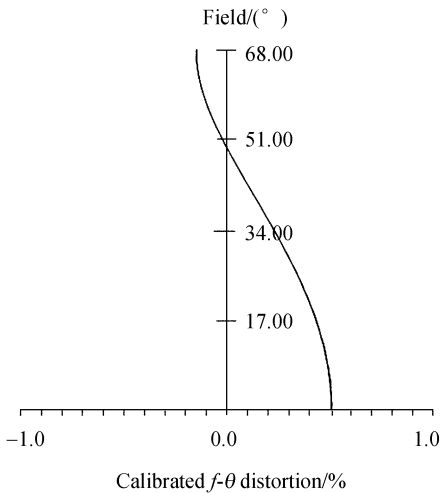
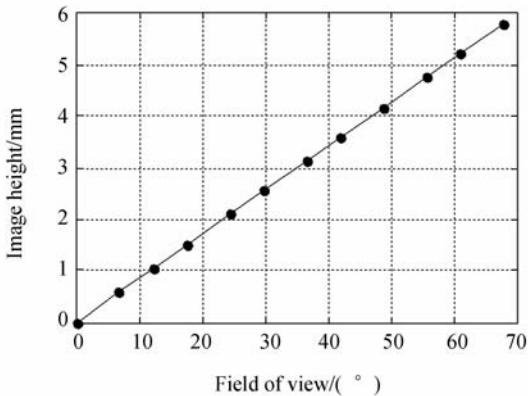
图6 $f\theta$ 线性特性曲线Fig. 6 Linear characteristic of $f\theta$ lens

图7 视场角与像高的对应关系

Fig. 7 Field of view vs. image height

场角与像高具有很好的线性关系。因此,该设计满足了高精度 $f\theta$ 系统的设计要求,保证了记录信息的真实性以及后续图像处理的准确性,实现了高精度卫星姿态控制。

5 结论

本文应用反远距结构设计了静态红外地平仪光学系统,给出了设计思想,设计指标,设计结果和像质评价。结果表明,反远距结构可以使系统获得大于焦距的后工作距,优化后,系统的后工作距为 15 mm;采用像方远心光路,提高了整个像面照度的均匀性,最终获得的整个像面上的照度均匀性 $>99\%$;合理地应用非球面很好地校正了各种初、高级像差,控制和平衡了彗差、像散和畸变,使光学系统具有较高的成像质量,15 lp/mm 处,系统的 MTF >0.6 ,接近衍射极限。此外,优化后系统的 $f\theta$ 线性特性小, $f\theta$ 线性特性的相对误差值 $<0.5\%$,保证了记录信息的真实性以及后续图像处理的准确性,提高了卫星姿态控制的精度。本文设计实现了现代地平仪系统的轻小、廉价、精度高、可靠性好的设计要求。

参考文献:

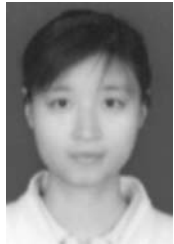
- [1] MARSHAL C D. Uncooled infrared sensors with digital focal plane array[J]. *SPIE*,1996, 2746: 23-31.
- [2] POTTER R F. *Germanium (Ge) in Handbook of Optical Constant of Solids* [M]. E. D. Palik Academic press,1985:469-475.
- [3] KARGBAUM W G, LEE S J, OKAMOTO A Y. Microbolometer earth sensor assembly [P]. *USA Patent*:6026337,2006-02-15.
- [4] 董峰. 面阵焦平面静态地平仪[J]. *红外*,2002,10: 8-13.
- [5] DONG F. Focal plane array static earth sensor[J].

Infrared,2002,10:8-13. (in Chinese)

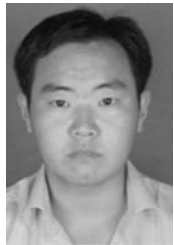
- [5] 李于衡,易克初,田红心. 一种提高红外地平仪确定卫星姿态精度的方法[J]. *红外与毫米波学报*,2007,26(3):178-181.
- [6] LI Y H, YI K C, HONG X T. New method to improve the accuracy of attitude determination based in an onboard infrared earth sensor [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(3): 178-181. (in Chinese)
- [6] 沈为明,薛鸣球,余建军. 长波红外广角地平仪镜头的光学设计[J]. *光学精密工程*,2002, 10(4):329-332.
- [7] SHEN W M, XUE M Q, YU J J. Optical design of a wide-angle lens for long-wave infrared earth sen-

- sors[J]. *Opt. precision Eng.*, 2002, 10(4): 329-332. (in Chinese)
- [7] 季铁群, 刘红军, 沈为民. F- θ 镜头的光学设计[J]. 光子学报, 2007, 36(1): 73-76.
JI T Q, LIU H J, SHEN W M. Optical Design of F- θ lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(1): 73-76. (in Chinese)
- [8] 王肇圻, 刘娟, 傅汝廉. 红外折/衍混杂 f-theta 镜研究[J]. 红外技术, 2006, 28(2): 77-80.
WANG Z Q, LIU J, FU R L. Design of hybrid refractive-diffractive F-theta lens working on infrared wavelength band [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(2): 77-80. (in Chinese)
- [9] 杨新军, 王肇圻, 母国光. 折/衍混合多光谱红外成像光谱仪离轴系统设计[J]. 光学精密工程, 2005, 34(4): 379-383.
YANG X J, WANG ZH Q, MU G G. Design of hybrid refractive/diffractive off-axial optical system for multispectral infrared imaging spectrometer [J]. *Opt. precision Eng.*, 2005, 34(4): 379-383. (in Chinese)
- [10] 董科研, 潘玉龙, 王学进, 等. 谐衍射红外双波段双焦光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 764-770.
DONG K Y, PAN Y L, WANG X J, et al.. Optical design of a HDE infrared dual-band step-zoom system [J]. *Opt. precision Eng.*, 2008, 16(5): 764-770. (in Chinese)
- [11] 刘英, 潘玉龙, 王学进, 等. 谐衍射/折射太赫兹多波段成像系统设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2065-2071.
LIU Y, PAN Y L, WANG X J, et al.. Design on imaging system with harmonic diffraction element in terahertz multi-band [J]. *Opt. precision Eng.*, 2008, 16(11): 2065-2071. (in Chinese)

作者简介:



刘英(1980-), 女, 山东滨州人, 博士研究生, 2005 年于山东师范大学获得学士学位, 主要从事红外光学方面的研究。E-mail: liuy613@163.com



曲锋(1984-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 2006 年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事红外图像处理方面的研究。E-mail: qu888@yahoo.com.cn

导师简介:



卢振武(1955-), 男, 吉林人, 研究员, 博士生导师, 1982 年于东北师范大学获得学士学位, 1985 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 主要从事波动光学、太阳能应用、新型光学系统及其在空间的应用等方面的研究。E-mail: luzw@ciomp.an.cn



孙强(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 2003 年于南开大学获得博士学位, 2006 年中科院长春光学精密机械与物理研究所博士后出站, 主要从事现代红外光学仪器方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn