

文章编号 1674-2915(2009)03-0200-05

红外焦平面静态地平仪用地球模拟器光机系统设计

张 振,童广辉,吕银环

(中国科学院 上海技术物理研究所,上海 200083)

摘要:根据红外焦平面静态地平仪的特点,并考虑地球模拟器(地模器)光学系统视场大、成像要求高等因素,在合理耗资的前提下设计了地模器的光机系统。通过分析地平仪的光学系统及工作原理,合理地选择了地模器的光学系统参数及机械结构,对地平仪和模拟器光学系统的匹配进行像质评价,并对机械结构做误差分析。结果显示,匹配后光学系统的RMS直径 $<27\ \mu\text{m}$,小于探测器像元尺寸。机械结构误差为 0.03° ,高于地平仪的探测精度。这些结果表明,该地模器基本满足检测红外焦平面静态地平仪的要求。

关键词:地球模拟器;红外静态地平仪;光学系统;机械系统

中图分类号:V414.19 文献标识码:A

Optical and mechanical designs of earth simulator for SIES

ZHANG Zhen, TONG Guang-hui, LÜ Yin-huan

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

Abstract: In consideration of the characteristics of a Static Infrared Earth Sensor(SIES) and the requirements of a earth simulator used in SIES for the large view fields and high imaging quality, the optical and mechanical systems of the earth simulator is designed based on a reasonable cost. After analyzing the working principle and the system structure of the SIES, this paper chooses rationally the optical parameters and mechanical structures, then makes an image evaluation for the optical matching of the SIES with the earth simulator. Finally, the mechanical errors in the system is analyzed also. Experimental results indicate the RMS diameter of the optical system is less than $27\ \mu\text{m}$, which is smaller than sensor pixel sizes and the structure error is 0.03° , which is higher than that of the sensor precision of the SIES. These data reported here show that the earth simulator is adequate for testing SIESs.

Key words: earth simulator; Static Infrared Earth Sensor(SIES); optical system; mechanical system

1 引 言^[1,2]

红外地平仪是卫星姿态控制系统常用的光电

姿态敏感仪器,其工作原理是通过地球与空间背景的辐射差获得地平圆的一部分(或全部)边界,并由边界信息通过各种算法获得卫星的姿态。红外焦平面静态地平仪(以下简称静态地平仪)是

国内首次采用非致冷红外焦平面探测器件的红外地平仪,相比传统地平仪,它获得的是整个地球的图像,拥有丰富的地平圆边界信息,通过灵活的算法可以获得更高的精度。随着近年小卫星技术的快速发展,红外焦平面静态地平仪拥有广阔的应用前景。

2 地球模拟器概述

为了在地面对红外焦平面静态地平仪进行测试与标定,本课题组研制了与之相适应的地球模拟器(以下简称地模器)。地模器的设计目标是在一定程度上对地平仪的探测目标(地球、空间背景)在几何空间、辐射光谱及辐射能量等物理层面进行模拟,它主要由热系统、光学系统及机械系统3部分组成。热系统用于模拟地球与空间背景的辐射差并产生符合卫星轨道与地球几何关系的地平圆,光学系统使热系统上任意点发出的辐射以平行光的形式进入地平仪的光学系统(卫星在空间中运行时,地球上的任意点发出的辐射都以平行光进入地平仪光学系统),机械系统则用于地平仪的安装及卫星姿态角的模拟,它包含二维转台(分别模拟俯仰角和滚动角)及升降台。在测试时,将转台的读数与地平仪读出的姿态角比较便可获得地平仪的准确度。其整个系统如图1所示。

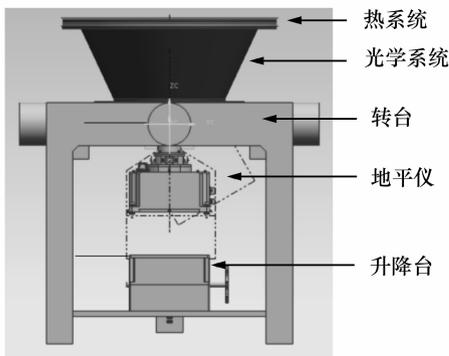


图1 整体系统

Fig. 1 Whole system layout

3 地模器的光学系统^[2~4]

地模器的光学系统用于将热系统上任意点发出的辐射以平行光的形式进入地平仪的光学系统,是对空间实际情况的模拟。光学系统将热系统成像至无穷远,可以有效地减少转台回转中心选取所造成的检测误差,并能缩小热系统的尺寸,所以光学系统的设计很有必要。

目前,静态地平仪主要用于低轨卫星,故地平圆对地平仪的张角很大,因此,用地模器对地平仪测试时,两者的光学系统还需要进行光瞳衔接,以避免能量损失或视场缺失。

此外,为适应不同光学系统的红外焦平面静态地平仪,地模器的光学系统还必须具有一定的通用性。本文针对地平仪的特点,分别讨论了地模器光学系统的主要指标:

1) 入瞳尺寸:入瞳尺寸决定了进入光学系统的能量,入瞳尺寸越大,系统的衍射分辨率越高。考虑到静态地平仪将通过提高衍射分辨率进一步提高精度,故入瞳尺寸的选择应在像差能满足要求的前提下尽可能做大(至少大于待测地平仪的入瞳)。而且,大入瞳尺寸可以允许一定的光瞳衔接误差。

2) 全视场:地模器的全视场应包含地平仪的全视场。考虑到全视场带来的设计难度,选择地模器的全视场为 150° 。

3) 焦距:焦距的选择以光学系统设计方便为原则,在入瞳尺寸一定的情况下,焦距越长像质越容易调整,但是焦距的增加也势必会增大整个系统的尺寸。

4) 入瞳距离:由于地模器在测试地平仪时它们的光学系统存在相对运动,入瞳距离的选择既要考虑到光学设计的难度又要保证地平仪与地模器相对运动时不发生机械干涉。

综合考虑以上因素后,设计了地模器的光学系统(如图2所示),其中一面为非球面,用于改善像质。

光学系统参数如下:

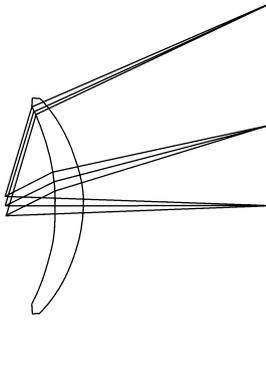


图2 地模拟器光学系统

Fig. 2 Layout of earth simulator optical system

入瞳尺寸:15 mm

入瞳位置:35 mm

全视场:150°

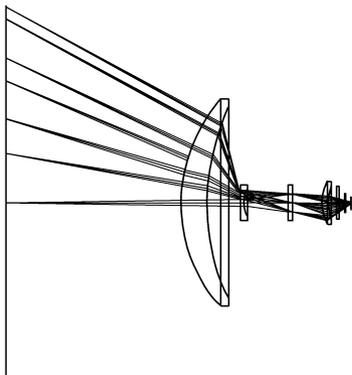
F 数:8.1

材料:锗

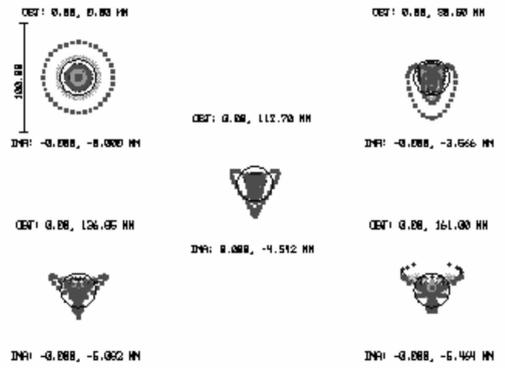
中心厚度:19 mm

透镜口径:172 mm

已知该静态地平仪探测器面元尺寸为 $45\ \mu\text{m} \times 45\ \mu\text{m}$, 将该光学系统与某静态地平仪的光学系统进行匹配 (0° 姿态角), 匹配结果如图 3 所示。

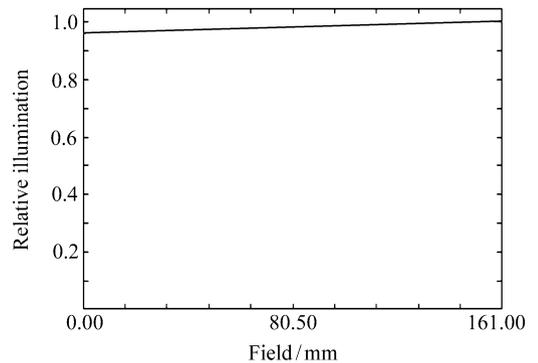
图3 光学匹配图(0° 姿态角)Fig. 3 Matching of optical systems(0° tilt)

匹配后光学系统的点列图如图 4 所示, RMS 直径列于表 1。可见成像效果满足要求 (艾利斑尺寸为 $32.6\ \mu\text{m}$), 该像质与地平仪像质几乎一致, 说明地模拟器的光学系统很好地产生了平行光。

图4 匹配光学系统点列图(0° 姿态角)Fig. 4 Spot diagram of matching(0° tilt)表1 匹配系统 RMS 尺寸(0° 姿态角)Tab. 1 RMS sizes of matching (0° tilt)

视场(归一化)	RMS 直径/ μm
0	26.172
0.5	22.372
0.7	19.4
0.85	19.886
1	23.48

由于地平仪以辐射差来识别地平圆边界, 故对光学系统的照度均匀性提出了要求。图 5 为相对照度曲线, 从曲线上可以看出各视场的照度较为均匀, 可以满足照度均匀性的要求。

图5 相对照度曲线(0°)Fig. 5 Relative illumination(0° tilt)

在模拟 30° 姿态角时 (地模拟器转台最大转角为 $\pm 30^\circ$), 光学系统的匹配结果如图 6 所示。此

时系统的点列图如图7所示,RMS直径则列于表2,由此可见成像效果仍满足要求。

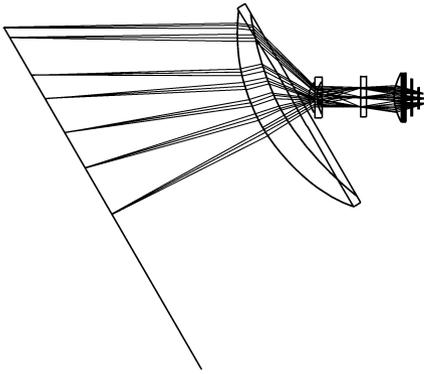


图6 光学系统匹配(30°姿态角)

Fig.6 Matching of optical systems(30°tilt)

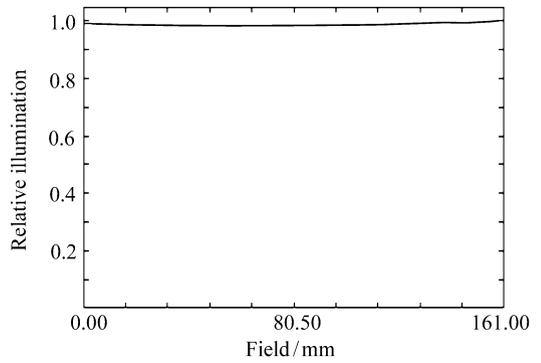


图8 相对照度曲线(30°姿态角)

Fig.8 Relative illumination (30°tilt)

加工难度和经济因素的考虑,最终选择采用一片非球面透镜完成设计。

4 地模器的机械系统^[5]

1) 光学系统与热系统的封装结构

机械结构用于封装光学系统及热系统,无运动部件,精度由机械加工精度来保证。另外由于地模器是通过更换热系统中的冷板来模拟不同轨道高度的,所以要考虑地模器热系统的更换方便,最终设计结果如图9所示。

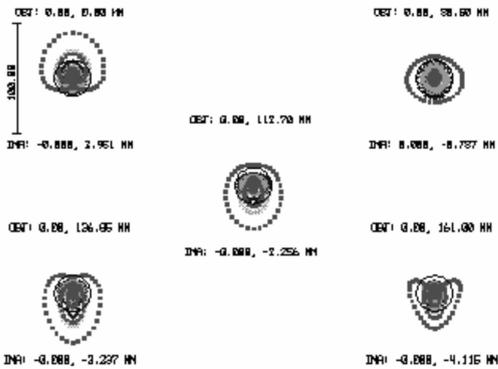


图7 匹配光学系统点列图(30°姿态角)

Fig.7 Spot diagram of matching(30°tilt)

表2 匹配系统 RMS 尺寸(30°姿态角)

Tab.2 RMS sizes of matching(30°tilt)

视场(归一化)	RMS 直径/ μm
0	25.506
0.5	22.466
0.7	24.426
0.85	26.278
1	20.662

图8为30°姿态角时的相对照度曲线,由该曲线可以看出,此时照度也是满足要求的。

值得一提的是,虽然更多片的透镜可以获得更好的像质,但由于该光学系统视场较大,势必会导致透镜口径的大幅增加,出于大口径锗透镜的

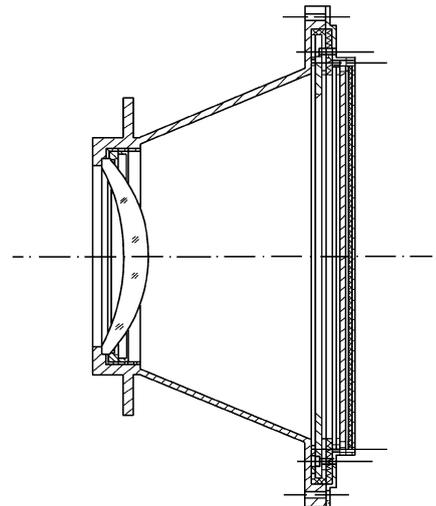


图9 光学及热系统的封装

Fig.9 Installation of optical and thermal systems

2) 转台

转台是地模器的重要组成部分,它包含二维

转动。分别模拟地平仪的滚动和俯仰姿态角,其转动精度为 $10''$,高于地平仪的探测精度。转台的转动由电机控制并可读出当前的转动角度,该角度值与地平仪测得值相比较便可评估地平仪的准确度。

转台上装有限位机构,用于防止电机失控时地平仪与地模器相碰造成损伤。

3) 升降台

升降台用于安装待测地平仪,由于地平仪与地模器的光学系统距离较近,不便于安装,故需要在远离地模器光学系统的位置先安装地平仪,再将地平仪升至光瞳衔接的位置。

升降台的升降精度为 0.02 mm ,带有自锁和读数装置,其精度直接影响光瞳衔接的精度。

综上所述,整个地模器系统的结构简图如图10所示,由图可见,地模器采用竖直的安装方式,这种方式可以使热板加热时热对流均匀,减小了热系统的非均匀性。

检测时,地平仪位于升降台上,转台带动光学系统及热系统旋转来模拟卫星姿态角。

地模器系统的误差主要来源于:1)加工及装配误差;2)转台的转动误差;3)升降台误差。由于误差因素较多,故采用了随机误差合成方法,结果表明综合系统误差为 0.03° ,满足地平仪的检测要求。

参考文献:

- [1] 李刚,周彦平. 卫星仿真测试用太阳模拟器和地球模拟器设计[J]. 红外技术,2007,29(5):284-287.
LI G,ZHOU Y P. Design of solar simulator and earth simulator for satellite attitude simulation[J]. *Infrared Technolo.*, 2007,29(5):284-287. (in Chinese)
- [2] 黄心耕. 准直式地球模拟器锗准直透镜光学系统的设计[J]. 航天控制,2004,22(3):54-57.
HUANG X G. Design of collimated lens optical system for collimated earth simulator[J]. *Aerospace Control*,2004,22(3):54-57. (in Chinese)
- [3] 王之江. 光学技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
WANG ZH J. *Optical Technique Handbook*[M]. Beijing:Mechanical Industry Press,1987. (in Chinese)
- [4] 刘恩海. 双圆锥小型地球模拟器研制[D]. 成都:电子科技大学,2003.
LIU E H. Design of the double-cone miniature earth simulator[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China,2003. (in Chinese)
- [5] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社,1981.
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing*[M]. Beijing:Mechanical Industry Press,1981. (in Chinese)

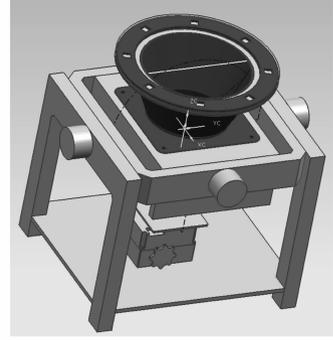


图10 总体机械结构

Fig.10 Whole mechanical system

5 结 论

本文提出了一种用于红外焦平面静态地平仪的地模器,设计了其光学系统及机械结构。其技术要点在于:1)利用更换冷板的方法模拟在不同轨道高度观察到的地球的大小。2)在热系统前安装大视场准直光学系统用于模拟处于空间的地球上的任意点发出的辐射以平行光进入地平仪的光学系统,并通过软件仿真证实了光学设计的质量。3)设计了地模器的整体结构,在保证精度的前提下方便地平仪的测试安装。

作者简介:张 振(1984—),男,上海人,硕士研究生,主要从事光学设计及结构设计的研究。

E-mail:sultansofswing@163.com