

卫星试验用小型地球模拟器研究

赵蕊¹, 张国玉¹, 陈吉¹, 高玉军²

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022; 2. 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 针对卫星同步轨道高度, 研制了卫星试验用小型地球模拟器, 解决了红外地球敏感器地面模拟试验测试和精度标定问题。介绍了准直式红外地球模拟器总体方案。采用红外光学系统设计与计算技术, 设计了锗准直透镜, 通过理论分析和光学计算, 得出地球光阑、热地球位置和大小与地球张角、锗准直透镜光学参数之间的关系, 分析了地球张角偏差和光束平行度偏差对地球模拟器张角的影响, 为地球模拟器的研制提供了设计依据。

关键词: 地球模拟器; 红外地球敏感器; 锗准直透

中图分类号: V556

文献标识码: A

文章编号: 1672 - 9870 (2008) 01 - 0074 - 03

Research for the Minitype Earth Simulator for Satellite Experiment

ZHAO Rui¹, ZHANG Guoyu¹, CHEN Ji¹, GAO Yujun²

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022;

2. Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

Abstract: Aiming at the orbit height 35786Km of planet, this paper advances a minitype earth simulator for satellite experiment, resolving the problems of ground-based experimentation, testing, calibration for the infrared earth sensor. This paper introduces the components and the whole design precept of the miniature collimating infrared earth simulator. Introducing the design of infrared optical system, germanium collimating lens is designed. This paper confirms its optics parameter, finds the relations between earth diaphragm, place and size of hot earth, earth angle by theoretic analysis and optical calculation. It analyzes and calculates earth angle windage and beam parallelism windage and affords design foundation for the research of earth simulator.

Key words: earth simulator; infrared earth sensor; germanium collimating lens

卫星试验用小型地球模拟器是用于卫星姿态测量与控制关键部件——红外地球敏感器研制中的一项重要地面模拟标定试验设备。本文针对卫星同步轨道高度 35786Km 时的可靠性测试需求, 采用准直式方案^[1], 研制了卫星试验用小型地球模拟器, 给出红外辐射信号, 全面考核产品的光、机、电性能。解决了红外地球敏感器地面模拟实验测试和精度标定问题。该模拟器的研制对提高红外地球敏感器整机寿命试验具有重要意义。

1 模拟器总体结构与总体方案

所研制的卫星试验用小型地球模拟器主要由锗准直透镜及其组合件、地球光阑及其调整支架、热地球及其支架、地球光阑和热地球温控系统、地球光轴基准镜、平移底座和支架等组成。

同步轨道卫星真实工作情况距地面 35786Km, 地球的半径为 6356Km 至 6378Km (平均半径 6371Km)。地面试验时, 地球模拟器与红外地球敏感

器的距离最多有几米的距离,其直径也只能为1~2m的数量级。为模拟卫星在太空中所看到的地球,满足地球模拟器的功能要求,需确定如下方案:

a.在地面上模拟太空中所见到的地球状况,即模拟无限远的地球辐射,使红外地球敏感器的入射光为平行光;

b.模拟同步轨道高度,提供一种地球张角17.46°;

c.模拟地球与太空间的辐射亮度差;

d.应能做到红外基准和可见光基准的转换。

2 地球模拟器理论分析与计算

2.1 锺准直透镜的设计

锺准直透镜的设计是以视场角(地球张角)为出发点,根据方案选择,其形状为弯月型透镜。在设计中把地球光阑放在弥散斑最小的像面上,以满足地球光阑边缘点发出的红外辐射经透镜后形成一束半视场角为 ω 的平行光束,使模拟器能有效地模拟卫星在同步轨道上的工作状态,满足地球模拟器的使用要求。通过对锺准直透镜的理论分析和光学计算,得出地球光阑、热地球位置和大小,将为模拟器的设计提供依据^[2,3]。锺准直透镜光路如图1所示。

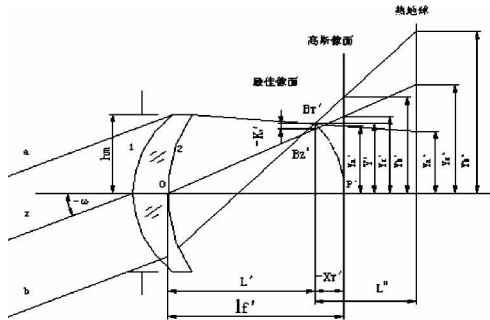


图1 锺准直透镜光路示意图

Fig.1 Object on light path for germanium collimating lens

图中, Y'_a 、 Y'_z 、 Y'_b 和 Y''_a 、 Y''_z 、 Y''_b 分别为某一视场角 ω 的轴外点发出的a、z、b三条光线经锺准直镜后在高斯面和热地球所在位置上的交点高度,其值可通过光路计算求出。通过对光路的分析,根据轴外点光线的光路计算方法可得到地球光阑位置 L' 、地球光阑直径 D' 和热地球直径 D'' 的计算公式。

2.2 地球光阑位置和直径的计算

地球光阑位置可由下式计算得到:

$$L' = l'_f - (-X'_T) = l'_f + \delta L'_T + x'_t \quad (1)$$

式中, X'_T 为子午像面弯曲,即 B'_T 点至理想像面的距离; $\delta L'_T$ 为轴外子午球差; x'_t 为细光束子午轴场曲; K'_T 为子午慧差,即 B'_T 到主光线的垂轴距离 $B'_TB'_Z$;且:

$$l'_f = f'(1 - \frac{d}{f'_1}) \quad (2)$$

$$x'_t = -\frac{Y'_b - Y'_a}{\tan U'_a - \tan U'_b} \quad (3)$$

$$X'_T = \delta L'_T + x'_t \quad (4)$$

$$K'_T = Y'_z - \frac{1}{2}(Y'_a + Y'_b) \quad (5)$$

式中, f' 为锺准直镜的焦距,且

$f' = \frac{nr_1r_2}{(n-1)[n(r_2-r_1)+(n-1)d]}$, $f' = \frac{n}{n-1}r_1$, r_1 、 r_2 、为锺准直镜曲率半径、 d 为中心厚度、 n 为折射率, U'_a 、 U'_z 、 U'_b 和 U''_a 、 U''_z 、 U''_b 分别为某一视场角 ω 的轴外点发出的a、z、b三条光线经锺准直镜前后与光轴的夹角,且 $U'_a=U'_z=U'_b=-\omega$ 。

地球光阑直径可由下式求出:

$$Y' = (L'_a - L')\tan U'_a \quad (6)$$

$$D' = 2Y'_p = 2\frac{\sum Y}{11} \quad (7)$$

式中 L'_a 为上边缘光线a的像方像距。

2.3 热地球位置和直径的计算

热地球尺寸 D'' 由下边缘光线b的像方视场角 U'_b 、像距 L'_b 以及地球光阑与热地球之间距离 L'' 、最佳像面位置 L''' 决定,如图1所示。

若热地球到地球光阑距离为 L ,则

$$\begin{cases} Y''_a = (L'_a - L' - L'')\tan U'_a \\ Y''_z = (L'_z - L' - L'')\tan U'_z \\ Y''_b = (L'_b - L' - L'')\tan U'_b \end{cases} \quad (8)$$

若热地球直径为 D'' ,则:

$$D'' \geq 2\max\{Y''_a, Y''_z, Y''_b\} \quad (9)$$

(本文中 $D'' \geq 2Y''_b$)

由公式(8)可求出 Y''_b ,则热地球直径 $D'' \geq 2Y''_b$ 。

2.4 地球光阑和热地球的位置与直径计算结果

取锺准直镜的光学结构参数为曲率半径 $r_1=509.26\text{mm}$ 和 $r_2=749.95\text{mm}$ 、中心厚度 $d=12\text{mm}$ 、有效通光口径 $D_0=\phi 150\text{mm}$ 、折射率 $n=4.0014$ 、视场角(地球张角) 2ω 取17.46°,对地球模拟器的计算结果为:

地球光阑位置 $L'=480.1910\text{mm}$ 。

地球光阑直径 $D'=150.4422\text{mm}$ 。

取地球光阑与热地球之间距离为 $L''=35\text{mm}$,

热地球直径 $D' \geq 172.4549$

3 地球模拟器像质评价与误差分析

对地球模拟器中使用的锗准直透镜,采用点列图、地球张角偏差及光束平行度偏差两种方法进行像质评价^[4,5],其光路图、点列图和像差曲线如图2、图3和图4所示。

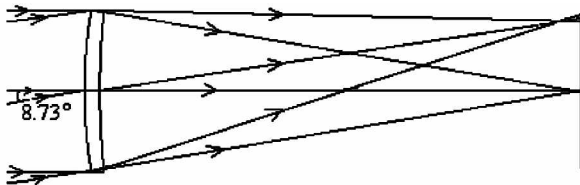


图2 系统光路图

Fig.2 graph of light path for system

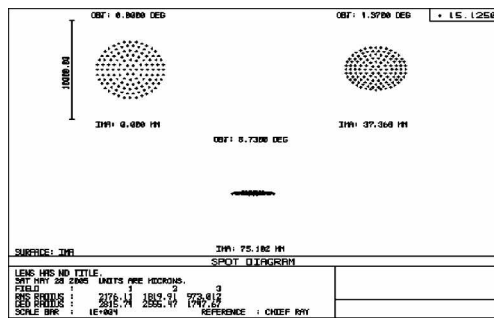
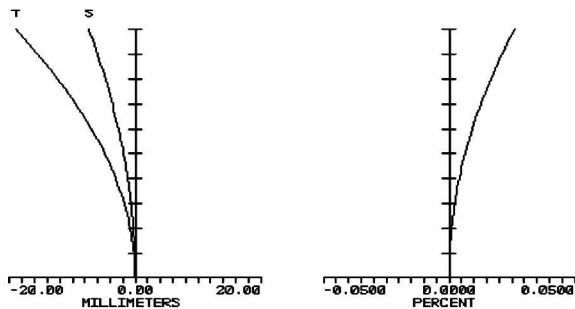


图3 $2\omega=17.46^\circ$ 视场角的点列图

Fig.3 spot diagram of the field angle $2\omega=17.46^\circ$



最大与最小子午场曲-19.7mm 和-0.00000152mm。

最大畸变 0.02639965%

图4 $2\omega=17.46^\circ$ 视场场曲和畸变像差曲线

Fig.4 the field curvature and deformation curve

for $2\omega=17.46^\circ$

由于锗准直透镜存在像差,整个光束不

可能完全平行。为验证地球光阑位置和直径数据选定的正确性,用Matlab编程正向、逆向追迹光路,如表1所示。

由表1的数据,可得到地球模拟器地球张角偏差和光束平行度偏差的计算结果:

地球张角 $2\omega=17.46^\circ$ 时,

光束平行度上偏差 $\Delta\omega'_+=0.017^\circ$

光束平行度下偏差 $\Delta\omega'_-=-0.0169^\circ$

光束平行度偏差 $\Delta\omega'_\pm=0.0339^\circ$

地球张角偏差 $\Delta\omega'_\pm=0.0138^\circ$

锗准直透镜光学系统的出射角上偏差为 0.017° ,下偏差为 0.0169° ,计算得到视场角(地球张角)的相对误差分别为0.19%和0.19%,所设计的同步卫星轨道高度的地球光阑满足视场角度的要求。

表1 最佳地球光阑的出射角

Tab.1 the emergent angle of optimal earth diaphragm

视场 h/h_m	入瞳高 (mm)	$8.730^\circ(^{\circ})$
1	75	8.7131
0.85	63.75	8.7160
0.707	53.03	8.7201
0.5	37.5	8.7274
0.3	22.5	8.7347
0	0	8.7438
-0.3	-22.5	8.7470
-0.5	-37.5	8.7443
-0.707	-53.03	8.7362
-0.85	-63.75	8.7270
-1	-75	8.7138

4 结 论

本文所介绍的卫星试验用小型地球模拟器,可准确在地面上模拟同步轨道卫星在太空中所看到的地球,平行度偏差和地球张角偏差满足设计要求,可供星上部件——红外地球敏感器在地面上性能测试和标定精度使用。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张国玉.高轨道准直式红外地球模拟器与张角标定技术研究[D].长春:长春理工大学,2005.
- [3] 李士贤,伍少昊.一种新型红外地球模拟器[A].展望21世纪初光电技术发展研讨会论文集,2000,172-175.
- [4] UdiEfrat.光学检测系统的优化和评估的新方法[J].电子工业专用设备,2004,33(1):69-77.
- [5] 杨国光.近代光学测试技术[M].北京:机械工业出版社,1986.