

文章编号: 1672-8785(2009)09-0012-04

红外焦平面静态地平仪地面检测方法研究

张 振 童广辉

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 本文针对红外焦平面静态地平仪的探测原理, 就该地平仪的探测目标 (地球及空间背景) 在几何空间、辐射光谱及能量等物理层面的模拟方法进行了详细讨论, 并在此基础上提出了设计带有大视场准直光学系统的地球模拟器和精密转台的地面测试方案。

关键词: 红外焦平面静态地平仪; 检测方法; 辐射计算; 大视场准直光学系统

中图分类号: TB657.9 **文献标识码:** A

Research on Ground Testing Method of Infrared Focal Plane Static Earth Sensor

ZHANG Zhen, TONG Guang-hui

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

Abstract: According to the detection principle of an infrared focal plane static earth sensor, the simulation of the detection objects (earth and space background) in geometry, radiation spectrum and energy is discussed in detail. A ground testing method of an earth simulator and its precision rotating platform equipped with a large field collimating optical system is proposed.

Key words: Infrared focal plane earth sensor; testing method; radiation calculation; large field collimating optical system

1 引言

红外焦平面静态地平仪是国内首次使用非致冷红外焦平面面阵器件的地平仪, 其原理是对整个地球成像, 通过地球和外层空间背景之间的辐射差获得地平圆边界并由此计算出卫星的姿态^[1]。相比传统的地平仪, 它具有精度高、无运动部件以及体积小等特点, 是未来地平仪发展的重要趋势。本文就红外焦平面静态地平仪的地面检测方法进行讨论。

2 模拟地球与空间背景的辐射差

红外焦平面静态地平仪的工作波段为 $14\mu\text{m}$ ~ $16\mu\text{m}$, 在该波段中, 地球的等效黑体温度为

220K ~ 290K, 空间背景约为 4K, 所以地平仪得到的地球图像是一个冷背景下灼热的圆盘^[2]。在地面进行测试时, 需要在几何空间、辐射光谱及辐射能量等层面对地平仪的探测目标 (地球及空间背景) 进行模拟。图 1 所示为模拟装置 (地球模拟器) 的简图。

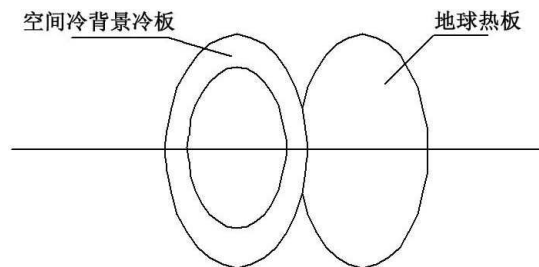


图 1 地球模拟器的原理图

收稿日期: 2009-05-20

作者简介: 张振 (1984-), 男, 上海人, 硕士研究生, 主要研究方向为光机结构设计。E-mail: sultansofswing@163.com

该装置由冷板及热板组成^[3], 冷板的温度较低, 用于模拟空间背景及限制地平仪看到的地球尺寸。热板的温度较高, 用于模拟地球。通过计算地球与空间背景及冷板与热板的光谱辐射量, 可以获得所需的温度差。

设地球的等效黑体温度为 220K, 中心波长为 $15\mu\text{m}$, 利用普朗克辐射公式可以求得地球在该波长处的光谱辐射发射量:

$$M_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$$

式中,

$$C_1 = 3.74 \times 10^{-12} \text{W} \cdot \text{cm}^2$$

$$C_2 = 1.44 \text{cm} \cdot \text{K}$$

由此可得:

$$M_{220} = 6.352 \text{W/cm}^3$$

$$M_4 \approx 0 \text{W/cm}^3$$

若设定冷板于某一固定温度, 利用下式:

$$\Delta M = k^* (M_{\text{热板}} - M_{\text{冷板}}) \approx M_{220}$$

可以得到热板与冷板的光谱辐射发射量之差。式中, k 为比辐射率。若 $k=0.85$, 冷板温度为 25°C , 可以求得热板所需温度为 56.67°C 。

地球的实际辐射强度会随季节、纬度等因素变化, 但其辐射强度差异相对地球与空间背景的辐射强度差为小量, 在地面进行模拟时, 一般可忽略这种差异。

测试地平仪时, 热板可以使用薄膜加热器加热, 将热电偶一端贴于冷板上, 将另一端贴于热板上, 利用温控仪对其温差进行控制。冷板可以用半导体制冷器或水冷设备进行降温, 并利用热电阻和温控仪对其进行温控。

3 在特定轨道高度模拟地球对地平仪的张角

卫星运行的轨道高度不同, 地球在地平仪探测器上的图像就有所不同。在没有姿态角的情况下, 这表现为地球图像直径的变化。轨道高度越高, 直径就越小。该变化的实质是地球对地

平仪的张角发生了变化。要模拟由轨道高度引起的变化, 有三种方案可以选择:

方法一: 改变地平仪与地球模拟器间的距离

该方法是对不同轨道高度的直接模拟, 其原理如图 2 所示。

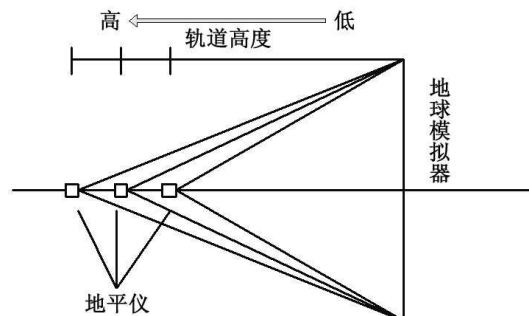


图 2 通过调整地平仪与地球模拟器之间的距离来模拟地球对地平仪的张角

当地平仪从某一位置逐渐远离地球模拟器时, 模拟的地球对地平仪的张角也在逐渐地变小, 这就模拟了轨道高度的升高。该方法的优点是简单易行, 但不能应用于带有准直光学系统的地球模拟器, 这是因为准直光学系统已经将地球模拟器成像至无穷远, 通过有限地调整地平仪至地球模拟器的距离是不能改变地球模拟器对地平仪的张角的。

方法二: 更换冷板

从上面的分析中已经知道, 冷板的内圈决定了地平仪看到的地球大小, 所以只要改变冷板的内圈尺寸, 模拟的地球对地平仪的张角也会得到改变, 该原理的示意图如图 3 所示。

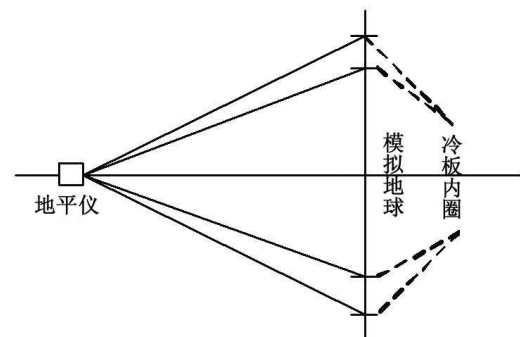


图 3 通过更换冷板来模拟地球对地平仪的张角

该方法的特点在于, 每针对一个轨道高度都要重新制作一块冷板, 但可以用于带有准直

光学系统的地球模拟器。由于冷板的结构简单, 加工成本较低, 所以该方法具有较高的可行性。

方法三: 采用变焦距光学系统

该方法是通过在地球模拟器前安放变焦光学系统实现模拟地球对地平仪的张角变化, 光学系统的短焦端对应于高轨道, 长焦端则对应于低轨道。变焦光学系统的优点是操作便捷, 可以实时地实现轨道高度的连续变化, 但其缺点是难以在各个焦段获得一致的成像质量。考虑到检测焦平面地平仪所要求的视场较大, 该变焦距光学系统在技术上实现起来较为困难。

4 模拟空间中地球上的点以平行光进入地平仪光学系统

卫星在空间中运行时, 其地平仪的光学系统相对于轨道高度是一个极小的值 (比值约为 10^{-6}), 所以地球上任意点进入地平仪光线的上光线、主光线及下光线之间的角度都非常小 (小于 10^{-6}rad), 可以看作平行光。在地面进行测试时, 有两种方法可以实现对平行光的模拟。

(1) 通过增加地平仪与地球模拟器的距离进行近似模拟

以下将通过计算获得模拟平行光所需要的距离。设地平仪的光学系统焦距为 f , 地球模拟器到地平仪光学系统的距离为 bf , H 为入瞳尺寸的一半, h 为模拟地球尺寸, 如图 4 所示。

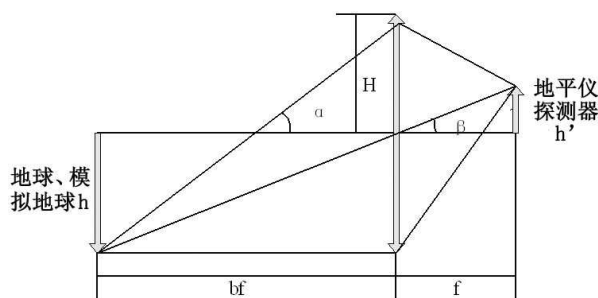


图 4 地球模拟器距离的计算

由几何关系推导可以得出:

$$\tan \alpha = \frac{h(h+H)}{hbf} = \frac{h}{bf} + \frac{H}{bf} = \tan \beta + \frac{H}{bf}$$

式中, α 、 β 为上光线和主光线对光轴的夹角。若 $H=5\text{mm}$, $\beta=75^\circ$, $\alpha=75.1^\circ$ (认为上光线

与主光线对入瞳的张角差异为 0.1° 时可看作平行光), $f=10\text{mm}$, 则可求得 $b>20$ 。对于下光线与主光线的夹角, 也可用类似的方法进行计算。可以证明, 针对以上所列的参数, 为了模拟平行光, 该距离至少要 20 倍于地平仪光学系统的焦距。

一般来说, 焦平面静态地平仪的全视场可以达到 140° 以上, 所以在 $20f$ 的距离下地球模拟器的尺寸将达到 1.5m , 这对温控是不利的。

(2) 使用大视场准直光学系统^[4,5]

若将地球模拟器安装在一套光学系统的焦平面上, 地球模拟器上的任意点将以平行光出射, 如图 5 所示, 该光学系统具有以下一些特点:

大视场。由于地平仪光学系统的视场要大于 140° , 所以该准直光学系统的视场应至少包含地平仪光学系统的视场。

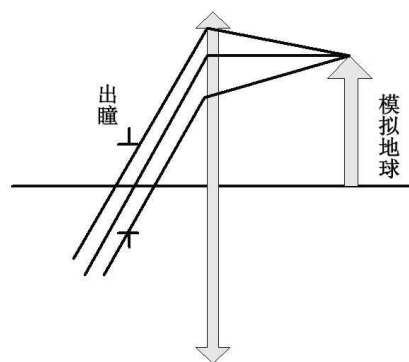


图 5 大视场准直光学系统的原理

出瞳距长。为了与地平仪的光学系统进行光瞳衔接, 必须将准直光学系统的出瞳拉出透镜, 该距离越长, 在模拟姿态角时就更容易避免机械干涉。当然, 出瞳距的增加会使准直透镜尺寸快速增大, 像差也会难以矫正。

出瞳尺寸大。大的出瞳尺寸有利于光瞳衔接, 也利于加强检测系统的适用性, 但大出瞳尺寸会加大各种像差。

在地球模拟器前增加准直光学系统除了可以模拟空间中的平行光外, 还可以有效地缩小地球模拟器的尺寸, 这可以从图 5 中看出。

5 卫星姿态角的模拟方法

地平仪在运行时将给出卫星俯仰及滚动两

种姿态角信息。在地面进行检测时,使用转台是模拟姿态角的有效方法。

如图 6 所示,转台的两根转轴分别对应于滚动轴和俯仰轴,在进行实验测试时,转台会带动地平仪或地球模拟器转动。将地平仪读数与转台读数作一下比较,便可获得地平仪的准确度。

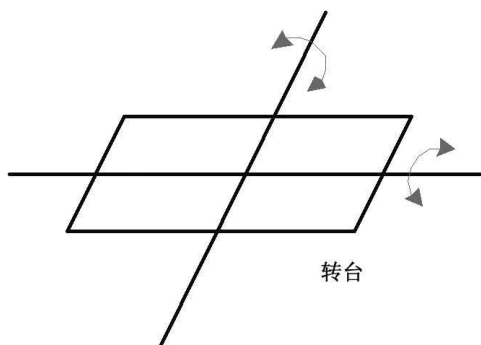


图 6 转台的原理

转台的回转中心应该位于地平仪的入瞳中心。对于不含有准直光学系统的地球模拟器,其检测误差对回转中心的选择较为敏感。通过计算可以得知,地球模拟器必须距离地平仪至少 $100f$ (f 为地平仪光学系统的焦距) 才能忽略由转台回转中心引起的检测误差,这将导致地球模拟器尺寸快速增大。

对于含有准直光学系统的地球模拟器,地球图像已成像于无穷远,所以回转中心的选择不会产生明显的检测误差,但是考虑到地平仪光学系统和地球模拟器光学系统的光瞳衔接要求,其回转中心仍应位于地平仪的入瞳中心,否则将引起能量损失甚至视场缺失。

6 结语

本文针对红外焦平面地平仪的探测原理,详细地讨论了地平仪探测目标(地球、空间背景)的模拟方法。

以下给出一些建议:

(1) 地球模拟器尽可能做得小一点,以保证温控性能。其冷板应为可更换部件,以模拟地平仪在不同轨道高度引起的地球红外图像变化。

(2) 在地球模拟器前安装大视场准直光学系统可以使地球模拟器上的任意点以平行光进入地平仪,更接近地平仪在空间中的实际情况,从而可缩小地球模拟器的尺寸。

(3) 高精度转台应便于安装待测地平仪和地球模拟器,且安装方式应考虑热对流对地球模拟器的影响。

整个测试系统的建议配置如图 7 所示^[6],它包括地球模拟器、精密转台、PCI 图像采集卡、电源和 PC 机。

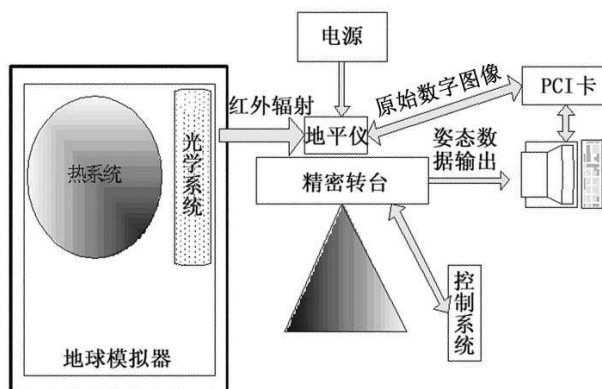


图 7 所建议的红外焦平面静态地平仪测试的配置

参考文献

- [1] 张华达. 红外面阵焦平面静态地平仪 [J]. 红外, 2004 (2): 1-9.
- [2] 龚惠兴. 红外地平仪 [J]. 红外物理与技术, 1979, 9: 1-13.
- [3] 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.
- [4] 王之江. 光学技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [5] 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.
- [6] 邓雷, 刘学明, 崔维鑫. 基于焦平面技术的红外地球姿态敏感方法研究 [J]. 科学技术与工程, 2006, 6(17): 2648-2652.