

高轨紫外地球模拟器光学系统的设计与仿真

薛召凯¹ 张国玉^{1,2} 张健¹

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

²光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 设计了一种空心发光椭球形紫外地球模拟器光学系统, 其中, 球体的一半被紫外光源照亮, 另一半球不被照亮。通过控制紫外LED灯组合成多个LED组元和灯阵实现工作谱段范围内球表面发光亮度在 $0.2\sim 1.2\text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ 可调, 发光表面亮度不均匀性优于20%, 使用该系统模拟不同太阳亮度时“地相”的几何特征、辐射特性。介绍了地球模拟器的组成和工作原理, 利用光学分析软件Lighttools对地球模拟器的辐射亮度不均匀性进行了仿真分析, 并利用有限元分析软件Ansys对高轨紫外地球模拟器光机结构在 $0\text{ }^\circ\text{C}\sim 45\text{ }^\circ\text{C}$ 的变形进行具体分析。结果表明, 球体表面亮度不均匀性为9.5%, 辐亮度的最大平均值为 $1.42\text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$, 且光机结构的温度变形量很微小, 满足设计要求。

关键词 光学设计; 地球模拟器; LED灯阵; 辐射亮度; 辐亮度不均匀性

中图分类号 V 524.3 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.092202

Design and Simulation of a High Orbit Earth Simulator Ultraviolet Optical System

Xue Zhaokai¹ Zhang Guoyu^{1,2} Zhang Jian¹

¹*School of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

²*Key Laboratory of Optoelectronic Control and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract A hollow ellipsoidal earth simulator optical system emitting ultraviolet (UV) is designed, half of the sphere is illuminated by the UV light source, the other half is not illuminated. It's combined into a number of LED components and light array working to achieve the luminescence brightness of $0.2\sim 1.2\text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ adjustable within the spectral range by controlling the UV LED lamps, and the inhomogeneity of surface emitting brightness is better than 20%; so the geometric and radiation characteristics of the earth under different brightness conditions can be simulated. The composition and working principle of the earth simulator is introduced, the inhomogeneity of the earth simulator's radiation brightness is analyzed using the optical analysis software called Lighttools, and the deformation of the opto-mechanical structure of the high orbit UV earth simulator at $0\text{ }^\circ\text{C}\sim 45\text{ }^\circ\text{C}$ is analyzed by the finite element analysis software called Ansys. The results show that the inhomogeneity of sphere surface brightness is 9.5%, the maximum average of the radiance is $1.42\text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$, the deformation of the optical mechanism influenced by temperature is very tiny and the design requirements are fully satisfied.

Key words optical design; earth simulator; LED light array; radiance; radiance inhomogeneity

OCIS codes 220.4298; 230.3670; 220.2945

1 引言

地球模拟器是用于地球敏感器地面模拟实验与标定中的一项重要测试设备^[1-5], 是模拟卫星在太空中所辨识到的地球。地球敏感器地面标定实验的精度, 直接反映出产品在轨工作的精度。近些年来, 国内对地球模拟器做了不少研究但是多数研究是针对红外地球模拟器开展的^[6-9]。可以说卫星地面测试很大程度依

收稿日期: 2014-02-26; 收到修改稿日期: 2014-04-21; 网络出版日期: 2014-07-28

作者简介: 薛召凯(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事航天器地面标定与检测、光学系统设计等方面的研究。

E-mail: kaige0106@163.com

导师简介: 张国玉(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事空间科学与技术、光电仪器与检测技术等方面的研究。

E-mail: zh_guoy@163.com(通信联系人)

靠模拟^[10]。高轨紫外地球模拟器可以在地面上模拟卫星在太空中不同轨道上所看到的地球,并作为卫星姿态测量控制关键部件——高轨紫外导航敏感器的观测目标,用于在地面对敏感器进行模拟实验、功能验证、精度测试等。近年来,随着航天技术的发展,要求紫外导航敏感器能在同步轨道上、下较大工作范围内工作,因此,需研发发光均匀、亮度可调的紫外地球模拟器。为此,本文设计了一种地球模拟器的光学系统,并应用Lighttools和Ansys软件对其光机结构进行了分析。

2 紫外地球模拟器的组成及工作原理

紫外地球模拟器总体结构图如图1所示,主要由底座及调整机构、空心发光椭球体(光学系统)及其支撑机构、控制系统与线缆、基准镜组件4部分组成。

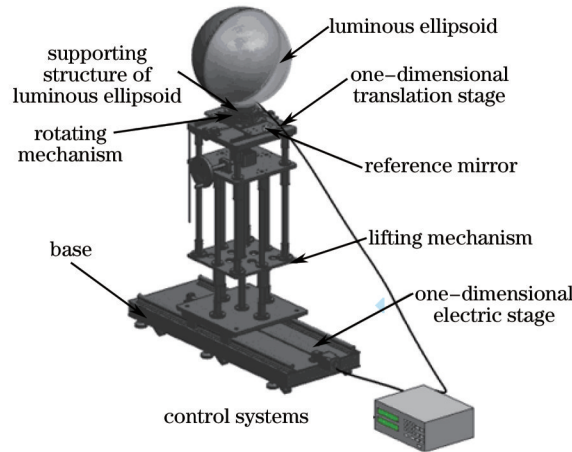


图1 地球模拟器总体结构图

Fig.1 Overall structure of the earth simulator

其中,地球模拟器的光学系统主要由紫外线LED光源、光源安装板、透明空心半椭球体等组成,用于模拟地球表面的辐射特性。高轨紫外地球模拟器采用空心发光椭球体模拟地球,其中长轴为 $637.8\text{ mm}\pm 0.1\text{ mm}$,短轴为 $635.7\text{ mm}\pm 0.1\text{ mm}$ 。紫外光源位于球体中心,即半球形安装支架球心与模拟器椭球体球心重合,球体的一半被紫外光源照亮,另一半球不被照亮。通过旋转装置使球体同光源一起绕固定轴旋转,可模拟出太阳位于不同方位时地球的成像情况,可供紫外导航敏感器进行信息的采集和处理。模拟器与敏感器之间的相对位置通过调节一维电动平台(X轴)、一维平移机构装置(Y轴)和升降装置(Z轴)来实现,可模拟敏感器在不同轨道高度上地球的成像情况。

3 紫外地球模拟器光学系统的设计

由于设计中要求空心发光椭球体表面发光亮度调节范围为 $0.2\sim 1.2\text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$,工作谱段为 $350\sim 360\text{ nm}$,LED的亮度调节范围约为200倍,可以更加精密地调节其发光表面的亮度,因此本设计中采用中心波长为 357 nm 、型号为5050 xl350-360的紫外线LED作为光源。根据其光谱曲线,利用微积分原理可以算出xl350-360型LED在 $350\sim 360\text{ nm}$ 波段的能量占全部波长总能量的百分比为 $8.958/24.48=36.59\%$ 。

$$L=l/t, \quad (1)$$

$$I=L\times S/2, \quad (2)$$

$$\Phi = I\times 2\pi, \quad (3)$$

式中 L 为光源的辐射亮度; l 为发光椭球体表面的辐射亮度; t 为空心发光部分椭球体透射率(0.6); I 为光源在半球内的辐射强度; Φ 为光源在半球内的辐射功率; S 为椭球体表面积。通过(1)~(3)式可以算出光源在 $350\sim 360\text{ nm}$ 波长的范围内辐射功率 Φ 的范围应为 $1.33\sim 7.98\text{ W}$ 。

紫外LED的排布方式有两种,一种是平面排布,另一种是球面排布。根据实际情况及建模仿真,球面排布时发光表面的均匀性能达到使用要求,为此选用球面排布的方式。紫外LED的排布规律如图2所示,在直径为 $\Phi 360\text{ mm}$ 的半球形安装支架上按建模时仿真结果阵列了57组LED,且每组LED的亮度可以通过电

源控制系统单独控制,其中每组为 3×3 的排布,如图3所示,共513只LED灯,每个紫外LED灯的功率为1.2 W,辐射功率为0.06 W,光电转换效率为0.5。通过计算可知LED光源总的最大发光功率为30.78 W,则光源在波长350~360 nm的范围内所占最大辐射功率为11.26 W > 7.98 W,满足光源功率要求。

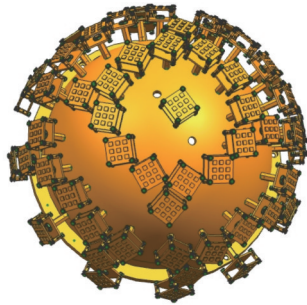


图2 紫外LED的阵列排布图

Fig.2 UV LED array arrangement

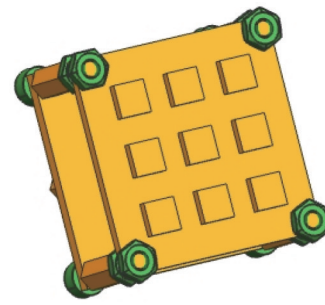


图3 单组LED结构图

Fig.3 Single LED structure

高轨紫外地球模拟器的发光椭球体采用分体式设计,选用能透过所需波长范围的亚克力半球和铝制半球椭球体组成整个空心椭球体。由于空心椭球体的大小要求精度很高(± 0.1 mm),所以发光半球采用目前较为先进的3D打印技术进行加工,且内表面进行发毛喷砂处理,以此来有效提高发光表面的辐亮度均匀性。

4 仿真分析

4.1 Lighttools仿真分析

将以上光学系统的外形尺寸、排布代入照明系统仿真设计软件Lighttools中,通过光学系统建模与蒙特卡罗方法对地球模拟器的辐亮度、发光面不均匀度等进行仿真分析,通过调整系统中各光学零部件的光学参数,寻找满足设计指标的系统仿真结果^[11]。

考虑到LED数量过多,因此在进行仿真模型的建立时将 3×3 灯组假设等效成一个LED组元。由于每只LED的光电转换效率为0.5,所以每组LED的辐射功率设置为0.54 W,根据LED发光曲线,设 $2\theta = 120^\circ$ 。发光半球表面设置为朗伯散射来模拟毛玻璃,设透射率为0.6。在发光半球表面处设置虚拟面,并且相应虚拟面上设置接收器,在接收器上添加亮度计。对系统追迹2百万条光线得出发光椭球体表面亮度与不均匀性的仿真结果。系统建模如图4所示,发光表面亮度仿真结果如图5所示。

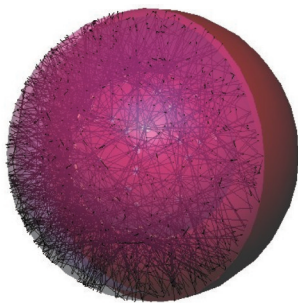


图4 系统建模图

Fig.4 System modeling

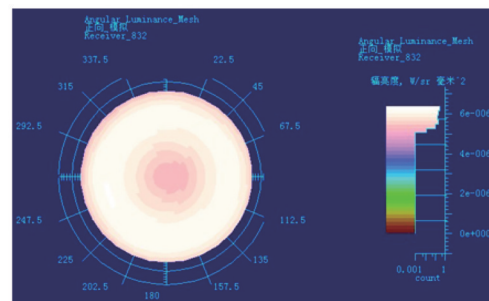


图5 发光表面辐亮度图

Fig.5 Emitting surface radiance

由仿真结果可知,发光表面亮度不均匀性为 $9.5\% < 20\%$,发光表面的最大辐亮度平均值为 $1.42 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2) > 1.2 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$,亮度最大峰值误差约为 $5\% < 10\%$ 。使用亮度计在发光表面随机取点进行亮度的测量,通过电源控制系统的调节得到最大辐亮度的平均值为 $1.45 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ 。

发光表面的不均性计算公式为

$$\frac{\Delta L}{L} = \pm \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中 L_{\max} 、 L_{\min} 为同一电流下发光表面亮度的最大值和最小值。通过(4)式可以算出发光表面的不均匀性为9.2%,实测结果与仿真结果很接近。由此可知仿真结果数据可靠,结果较为准确,满足设计使用要求。

4.2 Ansys 仿真分析

利用有限元对高轨紫外地球模拟器光机结构在 0 °C ~ 45 °C 的变形进行具体分析, 选用合适的材料便可满足温度使用要求, 其分析结果如图 6~8 所示, 变形结果如表 1 所示。

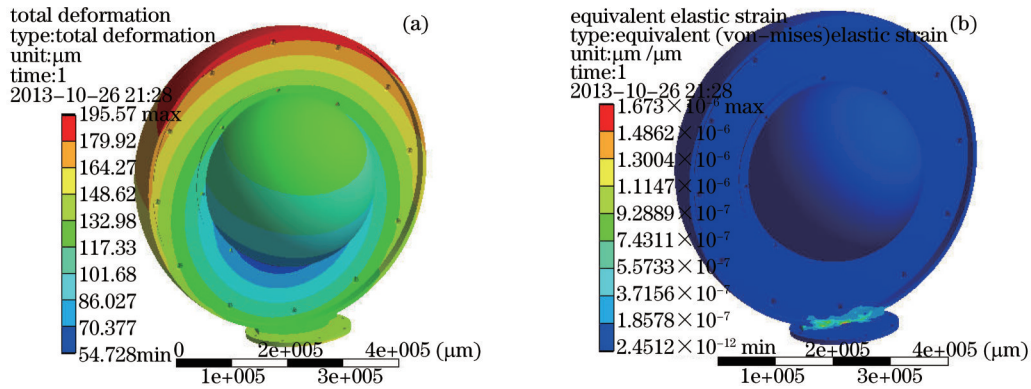


图 6 0 °C 时温度影响分析。(a) 0 °C 时模拟器整体温度变形; (b) 0 °C 时模拟器整体温度应变

Fig.6 Analysis of temperature impact at 0 °C. (a) Overall temperature deformation of the simulator at 0 °C; (b) overall temperature strain of the simulator at 0 °C

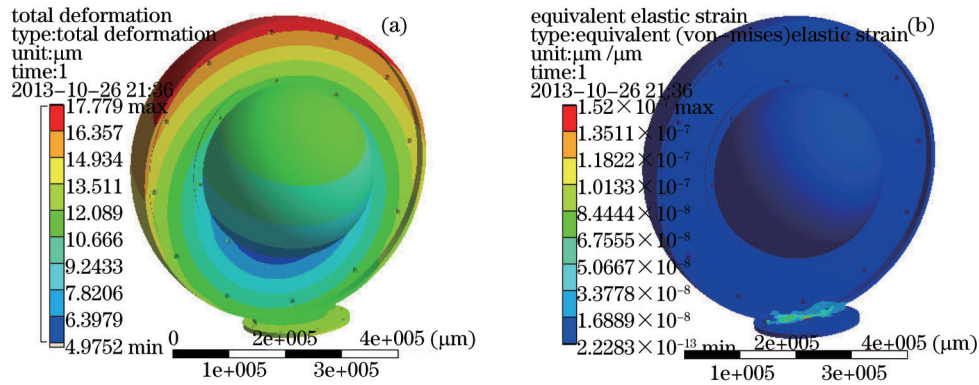


图 7 20 °C 时温度影响分析。(a) 20 °C 时模拟器整体温度变形; (b) 20 °C 时模拟器整体温度应变

Fig.7 Analysis of temperature impact at 20 °C. (a) Overall temperature deformation of the simulator at 20 °C; (b) overall temperature strain of the simulator at 20 °C

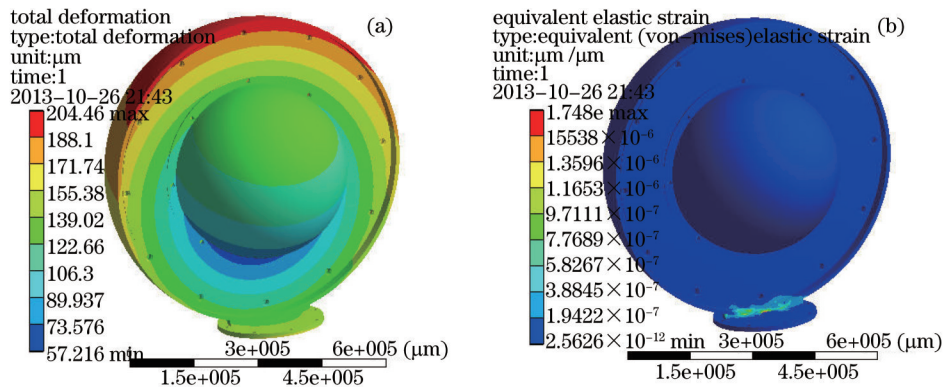


图 8 45 °C 时温度影响分析。(a) 45 °C 时模拟器整体温度变形; (b) 45 °C 时模拟器整体温度应变

Fig.8 Analysis of temperature impact at 45 °C. (a) Overall temperature deformation of the simulator at 45 °C; (b) overall temperature strain of the simulator at 45 °C

表 1 光机结构温度变化产生的变形结果

Table 1 Deformation of the optical mechanical structure due to temperature change

Material	Temperature range / °C	Maximum deformation / μm	Maximum strain / (μm / μm)
Whole simulator(7A04)	0 ~ 20	178	1.52×10^{-6}
	20 ~ 45	187	1.6×10^{-6}

紫外光源的工作温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,电学器件的工作温度一般为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$,且由表1的分析结果可知,光机系统的温度变形量微小,可满足工作温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的设计使用要求。

5 结 论

根据高轨紫外地球模拟器的设计要求,设计了模拟器的光学系统,可模拟太阳位于不同方位时地球的成像情况。通过Lighttools、Ansys等软件的仿真结果显示,发光表面亮度不均匀性为9.5%,小于20%,发光表面辐亮度的最大平均值为 $1.42\text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$,大于 $1.2\text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$,光机结构的最大温度变形量为 $187\text{ }\mu\text{m}$ 、最大应变量为 $1.6\times 10^{-6}\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$,非常微小,均可满足设计使用要求。

参 考 文 献

- 1 Ermakov O I, Soloviov I V, Strelchonok Y A. A new generation of the sun earth sensors[C]. ESA, 1997. WPP-129, 15-17.
- 2 Janz S J, Hilsenrath E, Flittner D. Rayleigh scattering attitude sensor[C]. SPIE, 1996. 2831: 146-149.
- 3 Desrignes F, Doittau F X, Jamet J, *et al.*. High accuracy static earth sensors[C]. Proc 1st ESA Conf on Attitude and Orbit Control Systems, 1997.
- 4 Wertz J R. Spacecraft Attitude Determination and Control[M]. Dordrecht: D Reidel Publishing Company, 1978.
- 5 Anderson R H. An advanced horizon sensor for synchronous altitude 3-axis stabilized satellites[C]. Proc 3rd Conf on Communication Satellite Systems, 1970. 70-476.
- 6 Li Gang, Zhou Yanping. Design of solar simulator and earth simulator for satellite attitude simulation[J]. Infrared Technology, 2007, 29(5): 283-287.
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): 283-287.
- 7 Zhang Guoyu, Zhang Fan, Xu Xiping, *et al.*. Small collimated infrared study of the earth simulator[J]. Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(3): 545-549.
张国玉,张 帆,徐熙平,等. 小型准直式红外地球模拟器研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(3): 545-549.
- 8 Zhou Xun, Zhao Fengxiu, Xing Hao. Temperature control system designed of the conical scanning infrared earth simulator[J]. Deep Space Exploration Research, 2009, 6(3): 36-39.
周 珣,赵凤修,邢 浩. 圆锥扫描式红外地球模拟器的温控系统设计[J]. 深空探测研究, 2009, 6(3): 36-39.
- 9 Wang Lingyun, Gao Yujun, Zhang Guoyu, *et al.*. Conical scanning infrared earth research[J]. Optical Technology, 2007, 33(5): 666-668.
王凌云,高玉军,张国玉,等. 圆锥扫描式红外地球模拟器研究[J]. 光学技术, 2007, 33(5): 666-668.
- 10 Ke Shouquan. Satellite Environmental Engineering and Simulation[M]. Beijing: Aerospace Press, 1993.
柯受全. 卫星环境工程和模拟试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- 11 Ren Lanxu, Wei Xiudong, Niu Wenda, *et al.*. A high flux solar simulator based on an array of non-coaxial ellipsoidal reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022002.
任兰旭,魏秀东,牛文达,等. 非共轴椭球面聚光阵列式高焦比太阳模拟器[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 0122002.