

大型月球模拟器光学系统设计及仿真

付明¹ 张国玉^{1,2} 郑如¹ 王国名¹

(¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022
² 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要 设计了一种口径为 $\Phi 2500$ mm 的大型月球模拟器光学系统, 通过控制不同波段 LED 灯组合成多个 LED 组元和灯阵实现 355~1000 nm 谱段月球光谱的模拟和不同月相的转换, 从而模拟特定月相的几何特征和辐射特性。介绍了大型月球模拟器的组成和工作原理, 利用光学分析软件 LightTools 对月球模拟器不同月相的辐亮度和辐照度不均匀性进行了仿真分析。结果表明, 满月时辐亮度为 $32 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$, 不同月相的发光面照度不均匀度为 14.7%, 亮度不均匀度为 17.2%, 满足设计要求。

关键词 光学设计; 月球模拟器; LED 灯阵; 辐亮度; 辐照不均匀性; 月相

中图分类号 V524.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.122202

Design and Simulation of Large-Scale Moon Simulator Optical System

Fu Ming¹ Zhang Guoyu^{1,2} Zheng Ru¹ Wang Guoming¹

(¹ School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
² Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement and Control Instruments, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract The optical system of a large moon simulator with the diameter of 2500 mm is designed. By controlling the LED light of different bands and combining it into multiple group elements and lamp arrays, the simulation of the moon spectrum and the transition of different moon phase in the spectral bands from 355 nm to 1000 nm is achieved. Thus the geometric characteristics and radiation characteristics of the particular “phase” are simulated. We introduce the composition and working principle of large moon simulator, and simulate and analyze the indicators including radiance and irradiation non-uniformity of different phases in the moon simulator by the LightTools software. The results show that the radiance is $32 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ when the moon is full, the illumination non-uniformity is 14.7%, and the brightness non-uniformity is 17.2% on the luminous surface of different phases of the moon. These parameters can meet the design requirements.

Key words optical design; moon simulator; LED light array; radiance; irradiation non-uniformity; phase of the moon

OCIS codes 220.2740; 220.4840; 220.4160; 220.4830

1 引言

月球模拟器是导航光学敏感器地面模拟试验和性能测试与标定的重要设备, 在地面上模拟月球光辐照特性, 用来模拟空间环境, 是试验系统内的目标模拟器^[1-2]。其主要作用是提供与月光光谱相匹配的均匀、稳定且具有一定辐照度的月球模拟信号, 为交会对接敏感器、导航敏感器提供目标源, 主要用于航天器(飞行

收稿日期: 2013-07-07; **收到修改稿日期**: 2013-07-20; **网络出版日期**: 2013-11-07

作者简介: 付明(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: 737561507@qq.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_guoyu@yahoo.com.cn (通信联系人)

器)空间环境模拟试验和精度标定以及敏感器地面测试中。在以往的模拟器研究中,主要针对太阳模拟器、地球模拟器和星模拟器^[3-4],对月球模拟器的研究鲜有报道。由于月光是来自于太阳光的反射光线,而月球模拟器的发光效应很接近太阳模拟器,因此我国曾经使用太阳模拟器光学系统并采用光学衰减片降低辐照度,来模拟月球的发光效应。但是,这种设计方法有原理复杂、成本较高、辐照光斑小等缺点,已经无法满足现在空间模拟的需求。随着我国航天技术的发展,研究在地面模拟空间光环境的大型装置越来越重要。为此本文设计了一种以 LED 阵列为发光面光源的大型月球模拟器,并对其光学特性进行了分析。此月球模拟器辐照面光斑较大、原理简单、成本较低,可同时模拟出月球不同月相时的辐亮度和发光不均匀性。

2 月球模拟器的组成及工作原理

月球模拟器总体结构如图 1 所示,主要由多灯拟合宽光谱光源、匀光板、宽光谱光源控制系统、计算机控制系统、模拟器机械系统、散热系统六部分组成,其中,多灯拟合宽光谱光源主要由多个 LED 组元组成,而每个 LED 组元由不同波段的 LED 组成,由多个 LED 组元组成多个 LED 灯阵,再由多个 LED 灯阵组合成宽光谱光源。月球模拟器的工作原理是通过不同波段 LED 灯组合实现 355~1000 nm 谱段月球光谱的模拟;通过多个灯组元和多个 LED 灯阵来实现月球辐亮度的模拟;通过控制 LED 灯阵中每个 LED 组元的亮灭来实现不同月相的模拟。匀光板(毛玻璃)的主要作用是将多灯拟合宽光谱光源发出的光线均匀照射至接收面处^[5]。

3 月球模拟器光学系统的设计

3.1 多灯拟合宽光谱光源的设计

3.1.1 光源功率的确定

月球模拟器作为敏感器的目标源,用于模拟特定“月相”的几何特征、辐射特性及月光光谱,采用多种波段 LED 组合的方式作为月球模拟器的光源。为保证所模拟的月相的几何特征,设计模拟 15 种特殊月相,并且可以手动修改出所需的其他月相;为实现设计指标中辐亮度和光谱的设计要求,所选的多种 LED 应覆盖 355~1000 nm 波长范围,并且具有较高的转换效率。可通过计算初步确定 LED 数量。

已知月球模拟器发光面为 $\Phi 2500$ mm,可根据应用光学^[6]计算出立体角 ω 和发光面积 A ,即

$$\omega = 4\pi \sin^2(U/2) = 4\pi \sin^2[(\arctan 1.25)/2] = 2.36, \quad (1)$$

$$A = \pi R^2 = 4.90625. \quad (2)$$

通过计算可知,当要求月球模拟器辐亮度大于等于 $20 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ 时,光源功率应大于 592 W。考虑到 LED 光电转换效率和匀光板的透射率,月球模拟器的光源(LED 灯阵)应大于 592 W。LED 的光电转换效率约为 30%,匀光板的透射率约为 40%,因此,初步计算宽光谱光源的功率应大于等于 9768 W。

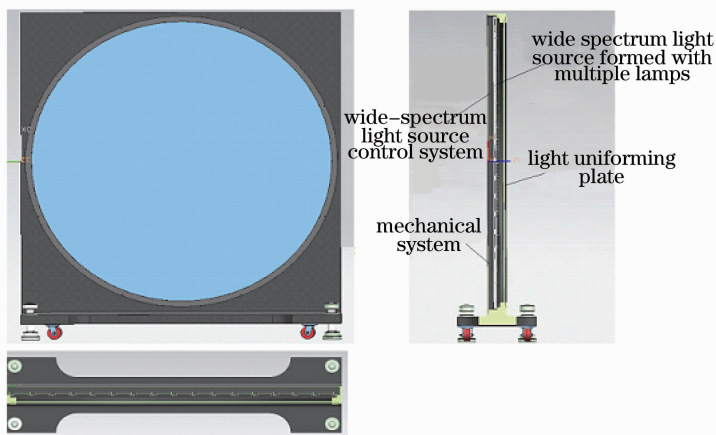


图 1 月球模拟器总体结构

Fig. 1 Overall layout of the moon simulator

3.1.2 光源光谱的确定

月球光谱曲线为太阳光谱曲线^[7],其光谱曲线如图 2 所示,其中 500 nm 为月球光谱曲线的峰值。结合技术指标中光谱 355~1000 nm 的要求,拟选用 8 种中心波长分别为 365、385、405、505、700、780、850、940 nm 的 LED 及白光 LED 组合,其光谱曲线与月球的光谱相接近。

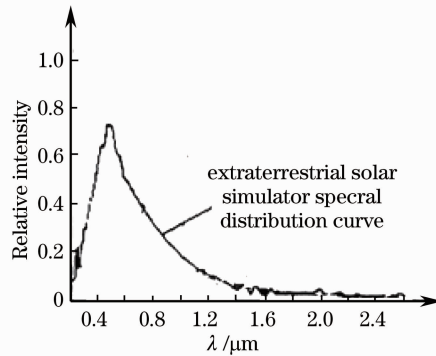


图 2 太阳/月球的光谱曲线

Fig. 2 Solar/lunar spectrum curve

3.1.3 宽光谱光源的设计与排布

月球模拟器的光源选用 LED,为实现 355~1000 nm 光谱宽度的模拟,采用以上 9 种具有不同光谱特性的 LED 进行组合。根据模拟仿真结果,设计的多灯拟合宽光谱光源由多个灯阵组成,每个灯阵由多个 LED 组元组成;每个组元由 9 只 LED 构成(根据光谱需要确定)。利用这种排布方式,无论月相如何变化,其光谱均可覆盖 355~1000 nm,并且有利于发光面均匀性的模拟。同时,在计算控制方面,可采用每个组元 9 只 LED 同亮同灭、亮度可调的控制方法。

宽光谱光源的整体布局与设计如图 3 所示,宽光谱光源由 $16 \times 16 = 256$ 个 LED 灯阵组成,宽光谱光源的尺寸为 $2560 \text{ mm} \times 2560 \text{ mm}$,有效尺寸为 $\Phi 2500 \text{ mm}$ 。

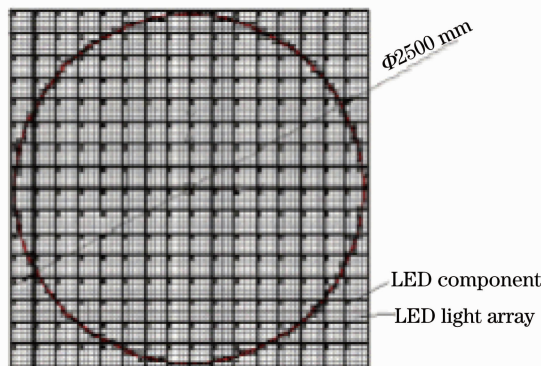


图 3 宽光谱光源整体布局

Fig. 3 Overall layout of wide-spectrum light source

3.2 匀光板的设计

设计的匀光板采用毛玻璃制作,起匀光作用,其尺寸为 $\Phi 2550 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。毛玻璃对不同波段的光透射率不同,在 355~1000 nm 波段范围实测透射率曲线如图 4 所示,其平均透射率大于等于 0.4。

4 LightTools 仿真分析

4.1 仿真分析方法与建模

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。一方面,可对上述计算所得到的光学系统设计参数进一步加以验证;另一方面,对系统进行模拟仿真设计^[8]。通过光学系统建模与蒙特卡罗方法对月球模拟器的辐亮度、照度、发光面不均匀度及月相等进行仿真分析,通过调整系统中各光

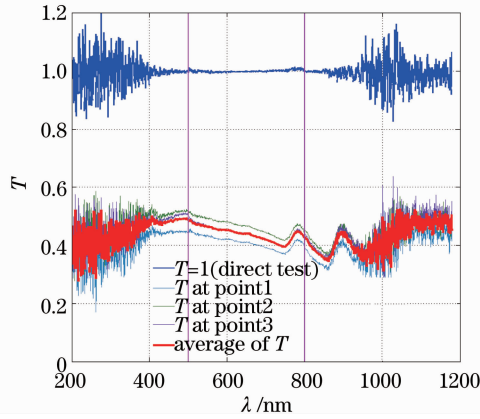


图4 毛玻璃透射率曲线

Fig. 4 Transmittance curve of frosted glass

学零部件的光学参数,寻找满足设计指标的系统仿真结果^[9-10]。

考虑到灯数量过多,因此在进行仿真模型的建立时将 3×3 灯组等效成一个LED组元。理论使用1 W的LED,但考虑到LED发光效率为30%左右,故设置LED功率为0.15 W,由于9个灯等效成一个LED组元,故设定功率为1.35 W。根据LED发光曲线,设置发散角为 $2\theta=120^\circ$ 。由发散角和发光面积,一个LED组元等效成 $27 \text{ mm} \times 27 \text{ mm}$ 。按给定的LED光谱曲线及配光曲线踩点生成可导入LightTools中的文件来加载。匀光板表面设置成朗伯散射来模拟毛玻璃均匀性,并且取毛玻璃透射率为40%,外形尺寸为 $\Phi 2500 \text{ mm}$ 。在毛玻璃表面设置虚拟面,并且在相应虚拟面上设置接收器,在接收器上添加亮度计,亮度计采用固定孔径方式,圆斑孔径设置为 $\Phi 5 \text{ mm}$,网格设置为 64×64 。对系统追击 6×10^7 条光线,最大误差峰值为 $1.2\% < 5\%$,符合追击要求,结果较为准确。月球模拟器整体仿真建模图及其模拟光线效果图如图5、6所示。

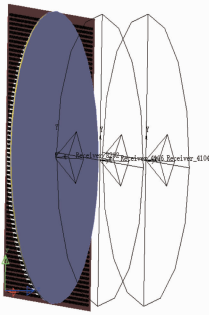


图5 整体仿真建模图

Fig. 5 Overall simulation modeling diagram

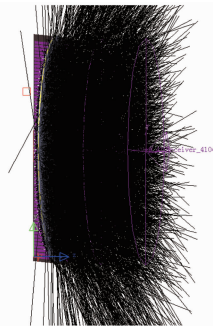


图6 模拟光线效果图

Fig. 6 Simulation diagram of the light rays

4.2 仿真结果

4.2.1 满月仿真结果

按满月设置排列光源中的LED组元,并在发光表面的位置设置照度、亮度接收面,根据仿真数据分别计算出 $\Phi 2500 \text{ mm}$ 发光面表面照度不均匀度和发光面亮度不均匀度。照度仿真结果如图7所示,照度不均匀度如表1所示;亮度仿真结果如图8所示,亮度不均匀度如表2所示。

表1 照度不均匀度

Table 1 Illumination non-uniformity

Maximum illuminance $/(W/m^2)$	Minimum illuminance $/(W/m^2)$	Illuminance uniformity $\%$
277.0	206.4	14.7

表2 亮度不均匀度

Table 2 Brightness non-uniformity

Maximum brightness $/(W/sr \cdot m^2)$	Minimum brightness $/(W/sr \cdot m^2)$	Brightness uniformity $\%$
35.3	24.9	17.2

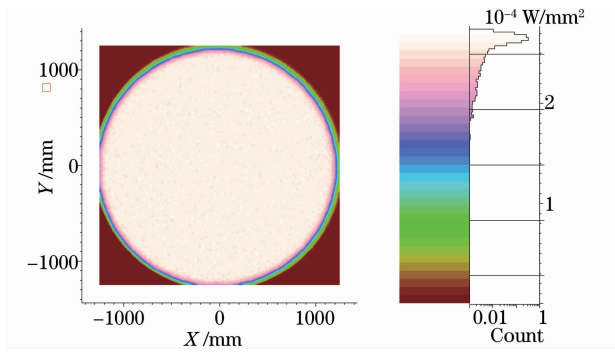


图7 照度仿真图

Fig. 7 Illumination simulation diagram

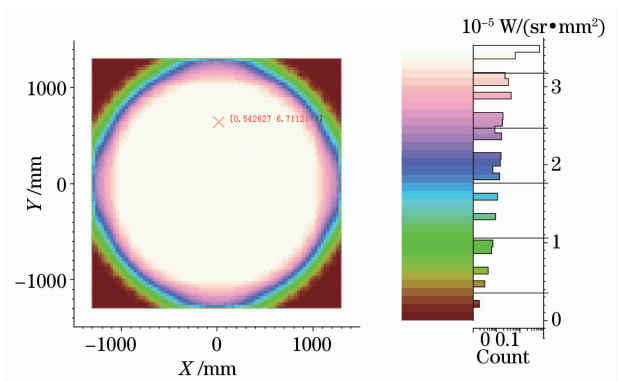


图8 亮度仿真图

Fig. 8 Brightness simulation diagram

4.2.2 不同月相仿真结果

月球模拟器需模拟 14 种特定月相并且可以手动设定所需的其他月相。14 种特定月相分别为新月娥眉月、残月娥眉月、上弦月、下弦月、上凸月、下凸月及每两种月相的之间的过渡状态。由于每对对称月相均以每个 LED 组元为一个单位,因此这对月相发光面不均匀度仿真结果一致。图 9 仅列出 7 种月相(其余 7 种与此一致)照度仿真图,仿真结果表明各月相不均匀度均小于 20%,满足设计要求。

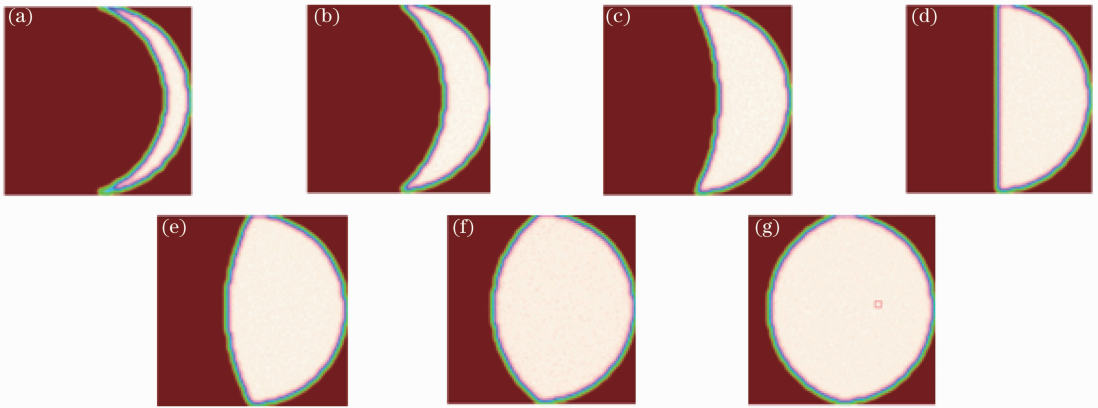


图9 月相图。(a)过渡月相 1; (b)新月娥眉月; (c)过渡月相 3; (d)上弦月; (e)过渡月相 5; (f)上凸月; (g)过渡月相 7

Fig. 9 Moon phase diagram. (a) Transitional phase 1; (b) crescent moon; (c) transitional phase 3; (d) half moon; (e) transitional phase 5; (f) convex moon; (g) transitional phase 7

5 结 论

根据模拟器的使用要求,设计了一种简单实用的大型月球模拟器,可用于模拟月球的真实特性以及不同月相间的转换。通过 LightTools 光学分析软件使用蒙特卡罗光线追迹的仿真结果显示,月球模拟器满月时辐照面辐亮度为 $32 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$,发光面照度不均匀度为 14.7%,亮度不均匀度为 17.2%,各月相辐照面不均匀度均小于等于 20%,结果符合技术指标中辐照面辐亮度大于等于 $20 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$,辐照面不均匀度优于 20% 的要求。随着我国探月工程的发展,对月球模拟器的研究必将越来越深入。

参 考 文 献

- 1 Xu Liang, The Optical Design of the Moon Simulator and the Analysis for Irradiance and Uniformity [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.
徐 亮. 月亮模拟器光学系统设计与辐照度均匀性分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
- 2 Su Shi, An Zhiyong, Zhang Guoyu, *et al.*. The research of the moon simulator for autonomous navigation experiment [J]. Chinese J Scientific Instrument, 2009, 30(6): 600–604.
苏 拾, 安智勇, 张国玉, 等. 自主导航试验用月亮模拟器研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 600–604.

- 3 Huang Xin, Ye Peijian, Zhang Wenming, *et al.*. A Small Moon UV Simulator [P]. China: CN101231168, 2008-07-30.
黄欣, 叶培建, 张文明, 等. 一种小型紫外月球模拟器[P]. 中国: CN101231168, 2008-07-30.
- 4 Yu Shuang, Zhang Guoyu. The optical design of the moon simulator [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2010, (3): 51-52.
于爽, 张国玉. 红外月球模拟器光学系统设计[J]. 装备制造技术, 2010, (3): 51-52.
- 5 北京远程匀光科技有限公司. 匀光板——新一代导光板 [J]. 广告大观(标识版), 2006, (3): 84-85
- 6 Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2008. 131-132.
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 131-132.
- 7 Fan En, Chu Jun, Wang Lu, *et al.*. Review of studies about methods on optimal bands selection of multispectral datasets of lunar surface [J]. Computer and Modernization, 2009, (4): 39-43.
范恩, 储珺, 王璐, 等. 月球表面多光谱数据最佳波段选择研究[J]. 计算机与现代化, 2009, (4): 39-43.
- 8 Chen Jiaqi, Chen Lanfeng, Wang Li, *et al.*. Design and simulation of high-collimating solar simulator [J]. OME Information, 2011, 28(11): 68-74.
陈家奇, 陈兰峰, 王丽, 等. 高准直太阳模拟器的设计与仿真[J]. 光机电信息, 2011, 28(11): 68-74.
- 9 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): 1022002.
- 10 Zhong Min, Zhang Guoyu, Lin Ziqi, *et al.*. Optical system of weather solar simulator [J]. Meteorologic, Hydrological and Marine Instruments, 2010, (4): 1-5.
钟民, 张国玉, 林子祺, 等. 气象用太阳模拟器光学系统仿真[J]. 气象水文海洋仪器, 2010, (4): 1-5.