

文章编号 2095-1531(2014)04-0657-08

大面积准直型太阳模拟器的设计与研制

高雁*, 刘洪波, 王丽, 顾国超

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘要:设计并研制了一种大面积准直型太阳模拟器,其有效辐照面直径达到1100 mm,平均辐照度达到1.3个太阳常数(AM0),光束准直角为 $\pm 1.59^\circ$ 。首先给出了太阳模拟器的光学系统,分别从光源选择和布局,椭球镜设计和准直镜设计进行了阐述;介绍了太阳模拟器的光机结构;进行了系统的仿真和实现。实验表明,太阳模拟器的平均辐照度达到 1760 W/m^2 ,辐照不均匀度达到 $\pm 4.6\%$,辐照体不均匀度达到 $\pm 5.96\%$,辐照不稳定度达到 $\pm 1.36\%$,光谱匹配在300~1400 nm波长范围内满足ASTM E927-10中AM0 B级要求,为航天有效载荷的热真空试验和热平衡试验提供了一个准确可靠的平台。

关键词:太阳模拟器;准直光束;大面积;离轴

中图分类号:V448.222; TH703 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20140704.0657

Design and manufacture of a large-area collimation solar simulator

GAO Yan*, LIU Hong-bo, WANG Li, GU Guo-chao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: ynogg@163.com

Abstract: A large-area collimation solar simulator is designed and manufactured. The diameter of effective irradiated surface reaches 1100 mm, the average irradiance reaches 1.3 sun constants(AM0), and the angle of collimation beam is $\pm 1.59^\circ$. This paper firstly describes the optical system of the solar simulator, and expounds the light source selection and layout, ellipsoidal reflector and collimating mirror design respectively. Secondly, this paper introduces the system structure, and then expounds the system simulation and implementation. The experiments show that the average irradiance reaches 1760 W/m^2 ; the irradiance non-uniformity reaches 4.6% ; the irradiance temporal instability is up to $\pm 1.36\%$; and the solar simulator spectral match meets the ASTM E927-10 the AM0 class B requirements in the wavelength range of 300–1400 nm. The solar simulator provides a precise and reliable platform of thermal vacuum and heat balance tests for the space payload.

Key words: solar simulator; collimation beam; large area; off-Axis

收稿日期:2014-02-21;修订日期:2014-05-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60507003);吉林省科技发展计划项目(No. 20130303009GX)

1 引言

在实验室中模拟太阳辐照对科学家和工程师来说一直是个挑战^[1],尤其是能够准确地模拟太阳辐照的准直性、均匀性和光谱特性的大型太阳模拟器。大型太阳模拟器主要用于航天器的热平衡试验、热控方案实施验证和材料的老化试验^[2]。应用大型太阳模拟器可以完成高精度的航天器热平衡试验,特别是对形状复杂、热耦合关系复杂的航天器^[3]。在大型太阳模拟器中,由于大面积的透射材料难以找到,故光学系统一般采用离轴反射式准直系统。随着航天有效载荷体积越来越大,所需要的辐照面积也越来越大。辐照面积越大,实现难度也越大,同时研制成本也会急剧增加。为更好地模拟太空环境,为大型航天有效载荷提供高精度的太阳光,本文设计了一种大面积准直型太阳模拟器;该系统有效辐照直径达到1 100 mm,光束准直角为 $\pm 1.59^\circ$,光学系统的离轴角为 39° 。

2 光学系统设计

2.1 光学系统组成及原理

太阳模拟器光学系统如图1所示,包括聚光阵列、积分器组件、石英密封窗口和准直反射镜等。采用离轴反射式,离轴角达 39° 。

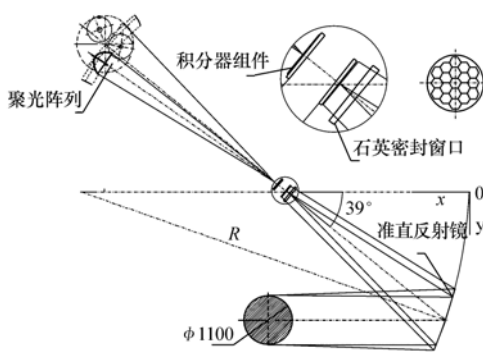


图1 模拟器光学系统

Fig. 1 Optical system of solar simulator

短弧氙灯、椭球反射镜和积分器组件属于太阳模拟器的照明系统,准直反射镜属于投影系统。根据椭圆的性质,氙灯光线从椭球镜第一焦点经过椭球镜反射无球差地汇聚到椭球镜第二焦点上。汇聚的光斑经过积分器组件分割再叠加,形成一个比较均匀的辐照分布,最后再通过准直反射镜投影到准直反射镜的后焦面上,形成要求的有效辐照面^[4]。

系统的不足之处在于离轴系统在结构上失去了对称性,因此通过积分器形成的均匀光斑经过离轴反射镜反射后,有效辐照面的辐照分布也失去对称性,这对系统均匀性的调节带来一定的难度^[5-6]。

2.2 光源的选择和形式

太阳模拟器的一个重要的指标是光谱匹配精度,这与光源的选择有直接的关系,理想状态是与太阳光谱完全一致。

太阳模拟器采用的光源主要有短弧氙灯、长弧氙灯、汞氙灯和金属卤化物灯等,其中短弧氙灯是一种气体放电灯,其色温在6 000 K左右,与太阳色温接近,而且氙灯的光谱分布与太阳光谱十分相似,是一种理想的太阳模拟器光源^[7]。与太阳光谱相比氙灯光谱在可见光部分与太阳光谱非常接近,但在800~1 000 nm有很多尖峰,加特制滤光片可以减小偏差,但会损失32%的系统能量。本系统的滤光膜直接镀在积分器投影镜上^[8-9]。

氙灯的布局会影响系统能量的利用率,这是非常重要的。太阳模拟器系统是一个能量照明系统,首先必须满足辐照面上的能量要求。本系统光源采用3只短弧氙灯组成阵列,每只氙灯功率为7 kW。

氙灯相对于椭球反射镜可以竖置和横置,如图2所示,仿真表明,横置可以更好地利用氙灯发出的光能量,而竖置则会产生较大的遮拦使能量利用率降低^[10]。结合氙灯的配光曲线^[11](图3),通过蒙特卡洛光线追迹仿真可知,二者能量相差约20%,故氙灯采用横置方式,即氙灯光轴与椭球反射镜光轴重合。

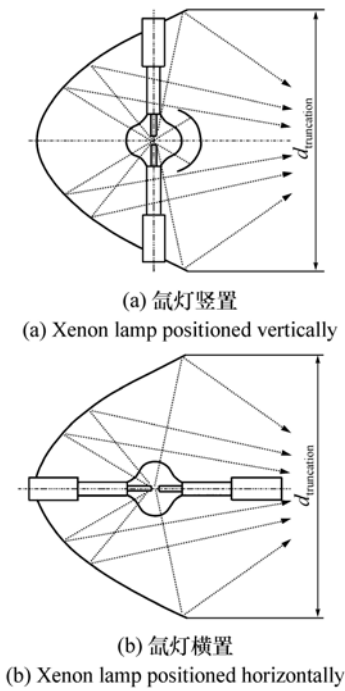


图 2 氙灯和椭球镜光学布局
Fig. 2 Optical configuration for Xenon lamp and ellipsoidal reflector

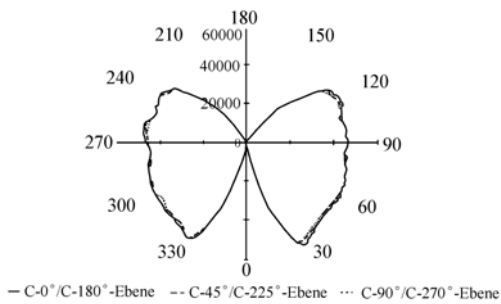


图 3 氙灯配光曲线
Fig. 3 Flux distribution of Xenon lamp

2.3 聚光镜设计

聚光系统采用椭球反射镜。椭球反射镜的性质是从一个焦点发出的光通过反射会全部汇聚到另外一个焦点上。根据图 4 所示的坐标系和椭圆的性质,在子午面内椭圆的方程可以表示为^[12]:

$$y^2 = 2Rx - (1 - e^2)x^2, \quad (1)$$

式中: $R = \frac{2F_2F_1}{F_2 + F_1}$ 为椭圆顶点的曲率半径, $e =$

$\frac{F_2 - F_1}{F_2 + F_1}$ 为椭圆的离心率。 F_1 为椭圆的第一焦距,

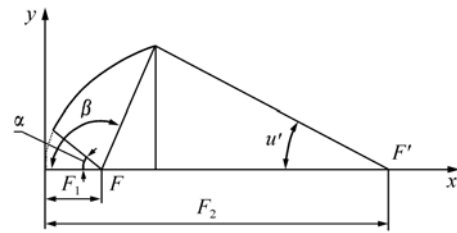


图 4 椭球反射镜的光学参数
Fig. 4 Optical parameters of ellipsoidal reflector

F_2 为椭圆的第二焦距, u' 为孔径角。

椭球聚光镜对氙灯氙弧的包容角 Δu 越大, 椭球镜汇聚的能量就越多, 同时椭球镜会越深而不好加工, 所以要综合考虑。 Δu 可以根据下面的公式得出:

$$\Delta u = \beta - \alpha, \quad (2)$$

式中: β, α 为椭球镜大小开口与光轴所形成的角度。

按氙灯的光电转换效率 0.45 计算, 一只 7 kW 氙灯难以满足系统能量要求, 所以采用由 3 套椭球聚光镜加氙灯组成的阵列式聚光系统。鉴于 7 kW 氙灯与 10 kW 氙灯的安装尺寸相同, 为了在有效辐照面上获得更高的能量, 可以更换 3 只 10 kW 的氙灯, 平均辐照度最高可达到 2.0 个太阳常数。

2.4 准直镜设计

球面准直镜设计相对孔径是决定光学系统聚光效率因素之一, 也影响到系统的总体布局。考虑轴上球面准直镜设计相对孔径, 取球面准直镜设计相对孔径 $\phi/f' = 1/3.841$, 有效辐照面直径设计值 $\phi = 1100 \text{ mm}$, 故球面准直镜焦距 $f' = 4225 \text{ mm}$ 。

由高斯计算公式求得球面准直镜的近轴曲率半径 $R = 2f' = 8450 \text{ mm}$ 。

计算无渐晕反射式球面准直镜有效通光口径 D 公式如下:

$$D = \frac{\phi + 2 \times l \times \tan\beta}{\cos(\alpha/2)}. \quad (3)$$

式中: l 为工作距离; α 为系统离轴角; ϕ 为有效辐照面积直径设计值; β 为光束准直角。

计算出准直镜通光口径, 取整 $D = 1500 \text{ mm}$, 准直镜参数非常重要, 后期克服光斑椭圆化的问

题,主要是靠调整准直镜参数。

3 系统的仿真和实现

3.1 光学系统的仿真

光学系统设计完成之后,通过 Light Tools 照明仿真软件进行仿真,通过仿真来检查光学系统设计的效果是否正确合理,同时对光学系统进行优化配置。

聚光阵列由3组聚光系统组成,如图5所示。每组聚光系统由椭球聚光镜和 XQ-7000 短弧氙灯组成。取椭圆的第一焦距 $F_1 = 80 \text{ mm}$,近轴放大倍率 $M_0 = 62.5$,椭球聚光镜内表面镀铝反射膜,铝反射膜在 $300 \sim 2\,500 \text{ nm}$ 波段范围内的平均反射率为 86%。初始仿真状态下氙灯的阴极与椭球聚光镜的第一焦点重合。

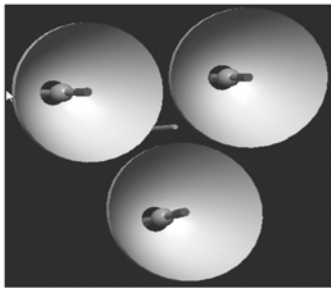


图5 椭球聚光镜阵列
Fig. 5 Ellipsoidal reflector array

光学积分器镜组建模如图6所示。光学积分器镜组元素透镜中的每一个元素透镜,采用平凸型正六面柱体,柱面外接圆直径为 67.68 mm ,镜体厚度为 8 mm ,曲率半径为 112.59 mm ,元素透镜与光胶板之间为光学胶合连接,各元素透镜柱面之间为分子吸合,镜组的形状为正六边形,由19个元素透镜组成。这种两个表面的分子吸合使得两个表面完全融合在一起。因此,在计算透镜和光胶板的透过率时,可视为一个整体光学件。光学积分器中的场镜和投影镜的元素透镜、光胶板材料均采用 JGS3 石英玻璃,在 $300 \sim 2\,500 \text{ nm}$ 波段范围内的平均透过率为 90%。AM0 光谱匹配滤光膜系镀在投影镜阵列上,透过率为 68%。

根据光学系统尺寸和布局在 Light Tools 中建模后,通过光线追迹计算来检查设计效果,同时可

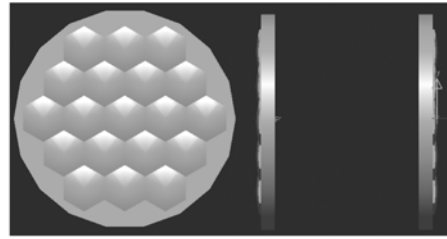


图6 光学积分器组件
Fig. 6 Optical Integrator module

以改变光学系统的一些参数来进行优化,从而得到最好的设计结果^[13]。光学系统的蒙特卡洛光线追迹如图7所示。

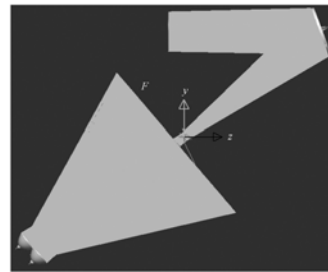


图7 蒙特卡洛光线追迹
Fig. 7 Monte Carlo ray-tracing for the system

在较大离轴角和相对孔径的系统中,由高斯公式计算得到的球面反射镜曲率半径与实际光路计算存在较大偏差,因此当系统中的准直反射镜面形采用球面面形时,将产生大量球面反射镜球差,这使得在子午面内由光学积分器出射的均匀光束经球面准直镜反射到辐照面上的光线向系统主光轴收敛,离主光轴越远的光线收敛越严重。这种光线收敛带来两点不利影响:一是辐照面在离轴的子午面内被明显的“压偏”,而在弧矢方向上中心是对称的。这就是离轴准直系统辐照面面形椭圆化的问题;二是辐照面边缘光线密度增加,辐照度增高,有效辐照面的辐照不均匀度变差。

解决办法通常有两种:第一是采用抛物面的准直镜;第二是对球面准直镜光学设计参数进行优化,改变有效辐照面的直径和曲率半径。由于抛物面的准直镜难以加工和检测,且成本较高,故本文采用了后者。优化设计时同时对主光线以及上下边光要综合考虑,且应顾及到边缘视场光线。经优化后有效辐照面满足了设计要求,同时辐照

面直径有所增大,有效辐照面上辐照度有所下降。

系统仿真结果如图8所示,在直径1100 mm的有效辐照面上,辐照不均匀度约为 $\pm 5\%$,辐照度可以达到1.47个太阳常数,说明光学系统设计没有问题。

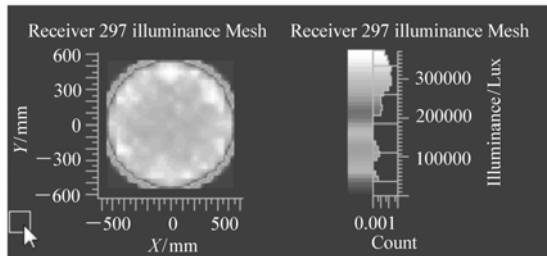


图8 系统仿真结果

Fig. 8 Simulation result of the system

3.2 太阳模拟器的结构

如图9所示,太阳模拟器的整体结构由聚光系统、风筒系统、遮光系统、积分器系统和准直镜系统5部分组成。

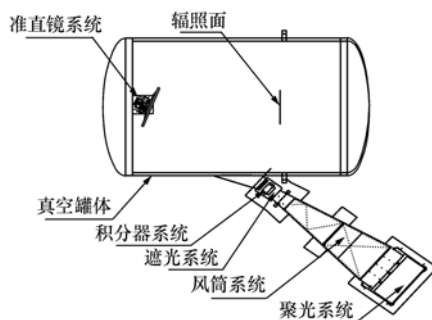


图9 系统结构布局

Fig. 9 Structural layout of the system

通常大型太阳模拟器系统能量较高,系统内部会产生大量的有害热能,所以其结构设计除考虑到系统中各光学零部件所要实现的安装、定位以及微调等功能外,还要重点考虑系统的换热设计,特别是对光学积分器组件和聚光阵列的换热。光学积分器组件是本系统光能传输通道中接收辐射最集中且接收面积最小的地方,因此也是产生热量最集中的地方,对光学积分器的换热采用循环水冷。聚光阵列换热采用强制对流风冷的形式,同时整个系统通过密封筒连接起来,形成一个密闭的光通道和风通道,采用大型离心风机换热。

椭球聚光镜和球面准直反射镜的制作采用电铸加工工艺。利用金刚石车床加工出椭球聚光镜和球面准直反射镜的凸模,并用金属电解沉积原理将金属材料沉积至指定厚度后脱模即可。椭球聚光镜材料厚度仅为3 mm的镍基底,光学表面直接镀铝反射膜和二氧化硅保护膜;球面准直反射镜为超精密镜面模具钢,采用与椭球聚光镜相同的制作工艺,厚度为8 mm,直径为1500 mm。镀膜后平均反射率达到86%,且机械强度高,面型精度高。电铸椭球镜具有较薄的厚度,因此散热效果极佳。

准直反射镜位于真空罐内,所以准直反射镜的热设计非常重要,温控系统满足以下要求^[14]:

(1) 太阳模拟器运行时,镜面温度控制在20~50℃,镜面温度均匀性必须控制在 $\pm 5\%$ 内;

(2) 太阳模拟器工作结束并准备开罐时,温控系统可使镜面温度升高至室温以上;

(3) 当设备加热除气时,为防止污染,温控系统可以加热镜面至120℃。

太阳模拟器的最终装调如图10所示,准直镜直径较理论计算要大,能将积分器投射过来的光

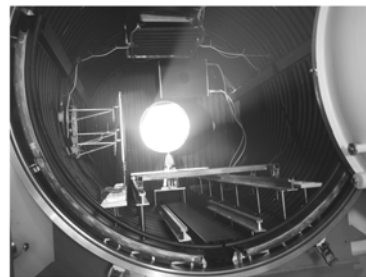


图10 太阳模拟器的测试

Fig. 10 Testing of solar simulation

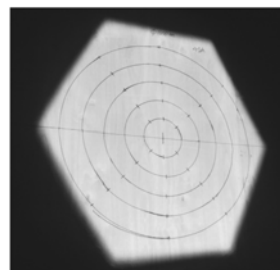


图11 太阳模拟器的有效辐照面

Fig. 11 Effective irradiated surface of the solar simulator

全部反射过去,形成一个内接圆直径为 1 100 mm 的六边形光斑,有效辐照面如图 11 所示。

4 太阳模拟器技术指标的测试

辐照不均匀度测量仪器使用的是标准太阳电池和高精度数字源表,太阳电池规格为20 mm × 20 mm。在 φ1 100 mm 的有效辐照面内平均分布 41 点进行测试,如图 12 所示。

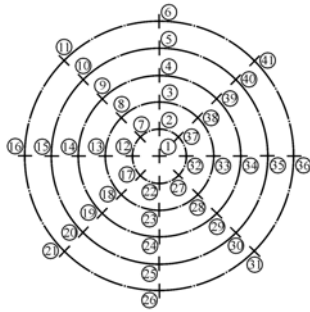


图 12 辐照不均匀度的测试

Fig. 12 Test of the irradiance non-uniformity

根据太阳模拟器测试标准^[15],最终测得有效辐照面辐照不均匀度为 ±4.6%,在有效辐照面 ±400 mm 距离内的辐照体不均匀度为 ±5.96%。

太阳模拟器辐照不稳定性表征辐照度随时间的变化,辐照不稳定性主要取决于氙灯和供电电源的稳定性。太阳模拟器采用 3 台 12 kW 的 AMETEK SPS60X250-K12D 高精度稳压直流电源来点燃 3 只氙灯,电源的供电稳定性小于 ±0.5%。根据测试辐照不稳定性达到 ±1.36%,满足 ASTM E927-10 A 级标准。

光谱检测设备采用荷兰爱万提斯公司的光谱仪,可见光和红外型号分别为: AvaSpec-2048 和 AvaSpec-256-NIR2.5,光谱测量范围分别为 200 ~ 1 100 nm 和 1 000 ~ 2 500 nm,光谱分辨率分别为 2.4 和 15 nm。太阳模拟器的实际光谱测试如图 13 所示,实测光谱与 AMO 太阳光谱的对比如图 14 所示,测量结果见表 1。

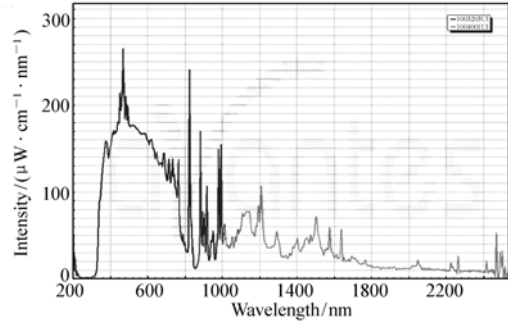


图 13 氙灯光谱测试图

Fig. 13 Test of Xenon-lamp spectrum with optical filter

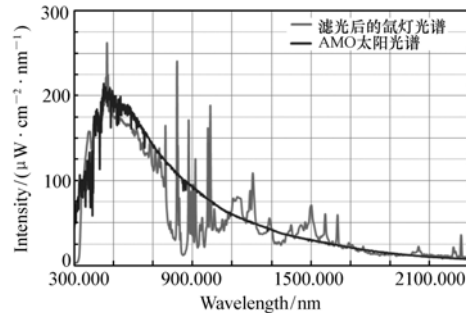


图 14 实测光谱与 AMO 太阳光谱的对比

Fig. 14 Comparison of AMO solar spectrum and measured spectrum

表 1 光谱测量结果对比

Tab. 1 Contrast of spectrum test results

波段/nm	积分值/($\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	所占百分比/%	AMO/%	相对偏差/%
300 ~ 400	1 413.2	6.78	8.00	-15.19
400 ~ 500	2 803.7	13.46	16.40	-17.92
500 ~ 600	2 856.8	13.72	16.30	-15.86
600 ~ 700	2 666.3	12.80	13.90	-7.91
700 ~ 800	2 159.7	10.37	11.20	-7.42
800 ~ 900	2 192	10.52	9.00	16.93
900 ~ 1 100	3 378.8	16.22	13.10	23.83
1 100 ~ 1 400	3 358.9	16.13	12.20	32.18
总和	20 829.4	-	-	-

由检测结果可知,最大偏差为32.18%,太阳模拟器光谱匹配满足ASTM E927-10光谱匹配等级B级标准。

5 结 论

本文设计并研制的大面积离轴准直型太阳模拟器在直径1100 mm的有效辐照面内平均辐照

度可以达到1.3个太阳常数,光束准直角为 $\pm 1.59^\circ$,同时其辐照不均匀度、光谱匹配误差满足ASTM E927-10 B级要求,辐照不稳定性满足A级要求。系统有效地克服了大面积离轴太阳模拟器的辐照面椭圆化这一通病,为航天有效载荷的热平衡试验和热真空试验提供了一个准确可靠的平台,同时为大型离轴准直型太阳模拟器的设计提供了思路。

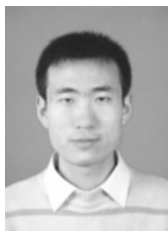
参考文献:

- [1] JENKINS P, SCHEIMAN D, SNYDER D. Design and performance of a triple source air mass zero solar simulator[C]. NASA/CP. Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2005.
- [2] 杨林华. 大型太阳模拟器研制技术综述[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(2): 173-178.
YANG L H. Large solar simulator development technologies[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2012, 29(2): 173-178. (in Chinese)
- [3] 高雁, 刘洪波, 王丽, 等. AAA级太阳模拟器的设计与研制[J]. 中国光学, 2013, 4(6): 570-576.
GAO Y, LIU H B, WANG L, et al.. Design and development of a class AAA solar simulator[J]. *Chinese Optics*, 2013, 4(6): 570-576. (in Chinese)
- [4] 单秋莎, 张国玉, 刘石, 等. 太阳模拟器的拉赫不变量传递[J]. 中国光学, 2012, 5(6): 639-645.
SHAN Q SH, ZHANG G Y, LIU SH, et al.. Lagrange invariant energy transfer of solar simulator[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 639-645. (in Chinese)
- [5] 高雁, 刘洪波, 王丽. 太阳模拟技术[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 104-111.
GAO Y, LIU H B, WANG L. Solar simulation technology[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2010, 3(2): 104-111. (in Chinese)
- [6] 田铁印. 空间多光谱相机光学系统设计[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(3): 78-81.
TIAN T Y. Optical design of multispectral camera[J]. *Optics Optoelectronic Technology*, 2013, 11(3): 78-81. (in Chinese)
- [7] 王元, 张林华. 一种新型全光谱太阳模拟器设计[J]. 太阳能学报, 2006, 27(11): 1133-1136.
WANG Y, ZHANG L H. Design of a new type of full-spectrum solar simulator[J]. *Acat Energiae Solaris Sinica*, 2006, 27(11): 1133-1136. (in Chinese)
- [8] 刘洪兴, 孙景旭, 刘则洵. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1447-1453.
LIU H X, SUN J X, LIU Z X. Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1447-1453. (in Chinese)
- [9] 陈文志, 蒋绿林, 姜黎, 等. 太阳模拟器的光谱设计实验研究[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0222002.
CHEN W ZH, JIANG L L, JIANG L, et al.. Experimental research of spectral design of solar simulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0222002. (in Chinese)
- [10] PETRASCH J, CORAY P, MEIER A, et al.. A novel 50 kW 11,000 suns high-flux solar simulator based on an array of xenon arc lamps[J]. *J. Solar Energy Engineering*, November 2007, 129: 405-411.
- [11] 顾国超, 王丽, 刘洪波, 等. 瞬态热量标定系统的太阳模拟器光学系统设计[J]. 中国光学, 2012, 5(6): 630-638.
GU G CH, WANG L, LIU H B, et al.. Optical design of solar simulator use for transient calorimeter calibration system [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 630-638. (in Chinese)
- [12] 罗青青. 宽光谱太阳模拟器的理论分析与整体设计[D]. 天津: 天津大学, 2009.
LUO Q Q. Theoretical analysis and integral design for wide spectrum solar simulator[D]. Tianjin: Tianjin University,

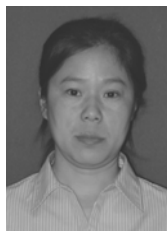
2009. (in Chinese)

- [13] 刘洪波,高雁,王丽,等. 高倍聚光太阳模拟器的设计[J]. 中国光学,2011,4(6):594-599.
LIU H B,GAO Y,WANG L,*et al.*. Design of high-flux solar simulator[J]. *Chinese Optics*,2011,4(6):594-599. (in Chinese)
- [14] 贾阳,万强,张容,等. 太阳模拟器准直镜热设计方法[J]. 航天器环境工程,2004,21(2):29-38.
JIA Y,WANG Q,ZHANG R,*et al.*. Thermal design method of solar simulator collimator[J]. *Spacecraft Environment Engineering*,2004,21(2):29-38. (in Chinese)
- [15] 任建岳,苏克强,王兵,等. 真空应用太阳模拟灯及其灯阵的研制[J]. 光学精密工程,2010,18(8):1699-1706.
REN J Y,SU K Q,WANG B,*et al.*. Development of vacuum application solar Simulation Xenon flash lamp array[J]. *Optics and Precision Eng.*,2010,18(8):1699-1706. (in Chinese)

作者简介:



高雁(1982—),男,吉林长春人,硕士,助理研究员,2006年于东北大学获得学士学位,2008年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail:ynogg@163.com



王丽(1964—),女,吉林长春人,高级工程师,主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail:ynogg@126.com



刘洪波(1956—),男,吉林长春人,硕士,研究员,1982年、1989年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail:hbliu120@sina.com



顾国超(1983—),男,吉林长春人,硕士,研究实习员,2007年于华中科技大学获得学士学位,2010年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail:ggc-2003@163.com