

文章编号 1004-924X(2010)08-1699-08

# 真空应用太阳模拟灯及其灯阵的研制

任建岳<sup>1</sup>, 苏克强<sup>1,2</sup>, 王兵<sup>1</sup>, 陈长征<sup>1</sup>, 张军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了对某相机进行热平衡试验, 并克服传统太阳模拟器结构复杂、成本较高、光效利用率低的缺点, 提出了将太阳模拟灯阵整体放在真空罐内使用的研制方案。首先, 对该方案所需解决的各种问题进行了理论分析, 计算得出模拟灯阵的辐照度要求为  $635.2 \sim 905.4 \text{ W/m}^2$ , 光学系统效率为 0.144 4。分析了真空罐液氮冷却系统的导热能力, 结果显示, 该冷却系统温度升高  $\Delta T$  为 2.0741 K, 小于其过冷度 4 K, 表明该冷却系统可以将太阳模拟灯阵灯的热量导出。对系统热设计进行了分析和讨论, 结果表明, 积分器和反射镜的温度在  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  左右, 氙灯灯极温度在  $92 \text{ }^\circ\text{C}$  左右, 满足其长时间正常工作的条件。最后, 测试了模拟灯阵的技术参数, 结果显示其照度为  $490.37 \sim 1\,000.56 \text{ W/m}^2$  连续可调, 辐照不均匀度  $< \pm 5\%$ , 辐照不稳定性  $< \pm 5\%/h$ , 各项指标均满足设计指标要求。

**关键词:** 真空应用; 太阳模拟灯阵; 光学积分器; 热设计

**中图分类号:** V416.5; V524.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101808.1699

## Development of vacuum application solar simulation Xe flash-lamp array

REN Jian-yue<sup>1</sup>, SU Ke-qiang<sup>1,2</sup>, WANG Bing<sup>1</sup>, CHEN Chang-zheng<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** In order to do the thermal balance tests for some type space-cameras and to overcome the shortcomings of traditional solar simulators in complicated structure, high costs and low light efficiencies, a simulated solar Xe flash-lamp array placed in a vacuum tank was developed. The theoretical principles of the simulated solar lamp array were analyzed, then it pointed out that its irradiance should be set to  $635.2 \sim 905.4 \text{ W/m}^2$  and its efficiency of optical system is 0.144 4. The heat conduction ability of the liquid nitrogen cooling system in the vacuum tank was analyzed, and the results indicate that the temperature of cooling system in the vacuum tank  $\Delta T$  is 2.074 1 K and lower than a super cooling temperature of 4 K, which means that the liquid nitrogen cooling system can export the heat of solar simulated lamp array out from the vacuum tank. The thermal design of the simulated lamp was analyzed and discussed, results show that the temperatures of optical integrator and mirror

收稿日期: 2009-06-27; 修订日期: 2009-09-13.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 863-2-5-1-13B)

are all around 200 °C, and the temperatures of cathode and negative electrodes of the lamp are around 92 °C, which meets their normal working conditions for a long time. Finally, the technological specifications of the simulated solar lamp were tested, it is shown that its radiation intensities are 600~1 000 W/m<sup>2</sup>, and the inuniformity and unsteadiness of radiation are less than ±5% and ±5%/h, respectively. Those data are well coincident with the design targets

**Key words:** vacuum application; solar simulation Xe flash-lamp array; optical integrator; thermal design

## 1 引言

应用太阳模拟技术研制的太阳模拟器是航天技术中卫星空间环境模拟设备的主要组成部分,用于为卫星以及相机提供与太阳光谱分布相匹配的、均匀的、准直稳定的光辐照,完成卫星以及相机的热平衡试验,以检验卫星以及相机的热设计<sup>[1-2]</sup>。理想的太阳模拟器的辐射光束输出特性应具有真实的太阳辐照强度、太阳光准直角、光谱分布、辐照稳定性和均匀性以及足够大的光束口径。由于技术水平以及模拟器造价的限制,目前还没有能模拟所有太阳特性的模拟器。一般模拟器按其用途不同可侧重于模拟太阳的某些特性。例如研究空间飞行器在太阳辐照下的热平衡、有关元件与材料的衰变、太阳电池的光电转变等模拟试验,侧重于模拟太阳光辐照强度、光谱分布和试验面的辐照均匀性,而放宽对太阳光准直角的模拟要求;而供卫星姿态测量部件(如太阳敏感器)测试标定用的太阳模拟器,必须严格模拟太阳光的准直角,模拟太阳圆盘的辐照均匀性和稳定性,而对其他要求则可以适当放宽。传统的太阳模拟器由于功率大、结构复杂均将太阳模拟器光源放在真空罐外而准直镜系统放在罐内使用<sup>[3-7]</sup>,通过真空密封窗口对罐内试验件产生辐照,不仅罐内辐照面积受限、光能利用效率低,而且操作不灵活;而若采用红外模拟技术,在光谱分布上与真实的太阳光又存在较大的差距。采用太阳模拟灯阵的方法可以解决以上问题。本文论述的在真空条件下应用的太阳模拟灯阵由 4 个太阳模拟灯组成,在某航天遥感器的热平衡试验中,整体置于真空罐内,太阳模拟灯阵不用准直镜系统和真空密封窗口,因而不仅结构简单、操作灵活、成本较低,而且光能利用效率较高。

太阳模拟设备的关键是光源的选择,目前世界上使用较为广泛的模拟器光源是氙灯。在电场

的激发下,氙气的放电光谱与太阳光谱最为接近。灯电流、氙气压力在较大范围内变化时,其光谱能量分布基本保持不变,光强分布好,能保证试验得到均匀的辐射强度。本文提出的装置使用氙灯作为太阳模拟灯阵的光源,其光谱分布与太阳光非常接近。另外启动装置也比较简单,使用寿命长,有效寿命约 1 000 h<sup>[8]</sup>。

## 2 理论分析及原理

### 2.1 太阳模拟灯阵的辐照度 $E$ 、光学系统效率 $K$ 以及氙灯运行最大功率 $W$ 的计算

日地平均距离处地球大气层外的太阳光谱总辐射量称之为一个太阳常数,其定义为在此处垂直于太阳辐射光的单位面积上,单位时间内接收的太阳辐射量为  $(1353 \pm 21) \text{ W/m}^2$ <sup>[9-10]</sup>。由于太阳光与相机的夹角  $\beta$  为  $28 \sim 42^\circ$ ,因此要求在辐照面为  $1\ 200 \text{ mm} \times 1\ 200 \text{ mm}$  时,真空应用太阳模拟灯阵的辐照度为:

$$E = 1\ 353 \sin^2 = 1\ 353 \sin(28^\circ - 42^\circ) = (635.2 - 905.4) \text{ W/m}^2, \quad (1)$$

太阳模拟灯阵的有效功率为:

$$W_{\text{eff}} = ES = (635.2 - 905.4) \times 1.2 \times 1.2 = (914.688 - 1\ 303.776) \text{ W}, \quad (2)$$

式中  $S$  为模拟器的辐照面积。

光学系统效率为:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 = 0.29 \times 0.85 \times 0.9 \times 0.85 \times 0.9 \times 0.95 \times 0.9 = 0.1444, \quad (3)$$

式中:  $K_1$  为氙灯光电转换效率,取值 0.29;  $K_2$  为聚光镜收集率,取值 0.75;  $K_3$  为聚光镜反射率,取值 0.85;  $K_4$  为光学积分器孔径利用率,取值 0.9;  $K_5$  为光学积分器装配利用率,取值 0.9;  $K_6$  为场镜、投影镜、叠加透镜的透过率,取值 0.95;  $K_7$  为平面反射镜反射率,取值 0.9。

氙灯运行最大功率:

$$W = \frac{W_{\text{eff}}}{nK} = \frac{1\,303.776}{0.144\,4 \times 4} = 2257.23\text{ W} = 2.23\text{ kW}, \quad (4)$$

其中:  $W_{\text{eff}}$  取最大值为  $1\,303.776\text{ W}$ ;  $K = 0.144\,4$ ;  $n = 4$ , 故本装置采用 4 个  $2.5\text{ kW}$  氙灯作为光源<sup>[11]</sup>。

## 2.2 真空罐液氮冷却系统温升

太阳模拟灯阵放在 ZM-4300 真空罐内使用, ZM-4300 真空罐液氮循环量  $G = 15\text{ m}^3/\text{h}$ , 计算真空罐液氮冷却系统温升如下:

$$\Delta T = \frac{Q}{GC_p\rho} = \frac{14}{\frac{1}{240} \times 2.093 \times 774} = \frac{14 \times 240}{2.093 \times 774} = 2.074\text{ K}, \quad (5)$$

式中  $G = 15\text{ m}^3/\text{h} = 1/240\text{ m}^3/\text{s}$  为液氮循环量;  $Q = W_{\text{total}} \cdot m = 10 \times 1.4 = 14\text{ kW}$  为总的热负荷,  $m$  为安全系数, 这里  $m$  取  $1.4$ ;  $C_p = 2.093\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  为液氮比热容 ( $84 \sim 88\text{ K}$ );  $\rho = 774\text{ kg}/\text{m}^3$  为液氮密度;

这里 ZM-4300 真空罐液氮冷却系统的过冷度  $> 4\text{ K} > \Delta T$ , 完全可以将太阳模拟灯阵的热负荷通过热沉导出去<sup>[12]</sup>。

## 2.3 技术要求

由于相机侧面为平面, 且包有由多层膜组成的多层, 多层最外层为 f46 镀铝薄膜, 经过对其光谱反射率的测试, 发现其表面对各个波段的反射率基本相同, 故对光谱匹配要求不高。研制中, 本文执行 GB/T12637-90《太阳模拟器通用规范》<sup>[13]</sup>, 辐照试验面积为  $1\,200\text{ mm} \times 1\,200\text{ mm}$ ; 辐照度为  $600 \sim 1\,000\text{ W}/\text{m}^2$ , 连续可调; 辐照不均匀度在辐照试验面内  $\leq \pm 5\%$ ; 辐照不稳定性  $\leq \pm 5\%/h$ ; 准直角为  $\pm 2^\circ$ 。

## 2.4 原理

该太阳模拟灯的光学系统如图 1 所示, 它由光源、反射椭球镜、平面反射镜、光学积分器组成<sup>[14]</sup>。

该灯阵由 4 个太阳模拟灯组成, 以四方阵型布置, 如图 2 所示。每个灯以  $2.5\text{ kW}$  高压短弧氙灯作为光源, 形成  $600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$  辐照面, 最后拼接成  $1\,200\text{ mm} \times 1\,200\text{ mm}$  辐照面。氙灯发光中心(阴极上方  $2\text{ mm}$  左右处)置于椭球镜第一焦点处, 氙灯发出的光经由椭球镜反射到反射镜, 再由反射镜反射到椭球镜第二焦点处的积分器, 经过积分器均匀化后通过前端叠加透镜, 在被

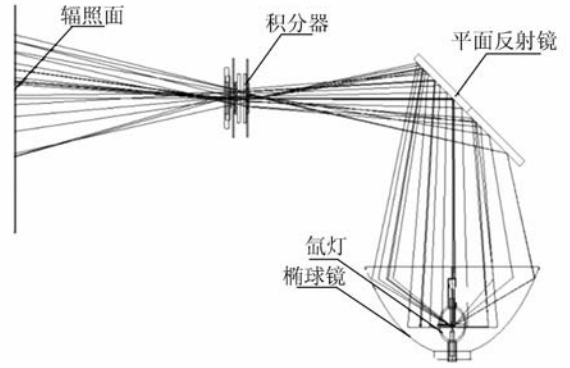


图 1 太阳模拟灯阵光学系统

Fig. 1 Optical system of solar simulation Xe flash-lamp array

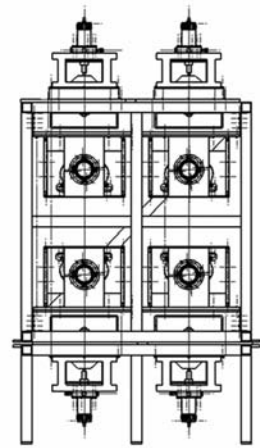


图 2 太阳模拟灯阵

Fig. 2 Solar simulation Xe flash-lamp array

照面形成均匀辐照模拟太阳光。在叠加透镜上镀有滤光膜, 以滤去不需要的波段。

## 3 机械结构设计

该太阳模拟灯阵机械结构由光学积分器组件、平面反射镜组件、灯室组件、氙灯调整机构、氙灯阴极导热机构以及框架等组成, 设计要点如下。

### 3.1 积分器组件

根据光学系统计算要求, 光学积分器有效通光口径为  $65\text{ mm} \times 65\text{ mm}$ , 光学积分器有 25 个光学通道, 每个光学通道由 1 对投影元素透镜和场元素透镜组成; 25 个投影元素透镜和场元素透镜按  $5 \times 5$  并排排列, 投影元素透镜、场元素透镜以及叠加透镜均采用石英制造。光学积分器机



题,本文提出了主动控制技术,利用热管的高导热率专门设计了氙灯的导热机构。热管导热性能如图 4 所示,其每根热管的导热功率标准为 55 W,在 160 ℃ 左右可达 80 W,这里采取阳极 24 根热管、阴极 8 根热管的导热方案。用有限元热模型进行了热分析,结果表明,氙灯阴阳极均在 100 ℃ 左右,低于 400 ℃,满足氙灯正常工作的温度条件。

用 SVC 公司的 HR1024 型光谱辐射计对太阳模拟灯进行了标定,测量精度为 ±5%。将 1 200 mm×1 200 mm 辐照面划分为如图 5 所示方格点,调节电源,测量各点辐照度。当电源输出功率最大时,测试各点的辐照度数值如表 1 所示,计算得出  $\bar{E}_{\max}=1\ 000.56\ \text{W}/\text{m}^2$ ;当电源输出功率最小时,测试各点的辐照度数值如表 2 所示,计算得出  $\bar{E}_{\min}=490.37\ \text{W}/\text{m}^2$ ,满足辐照度 600~1 000  $\text{W}/\text{m}^2$ ,连续可调的技术要求。

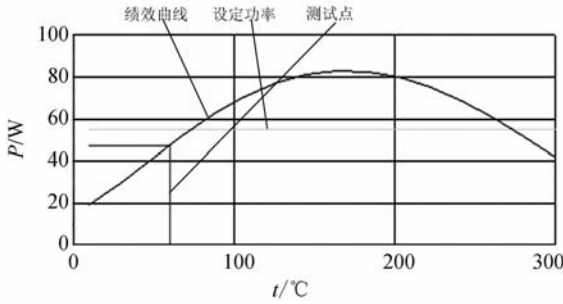


图 4 热管导热性能

Fig. 4 Conducting performance of heat pipe

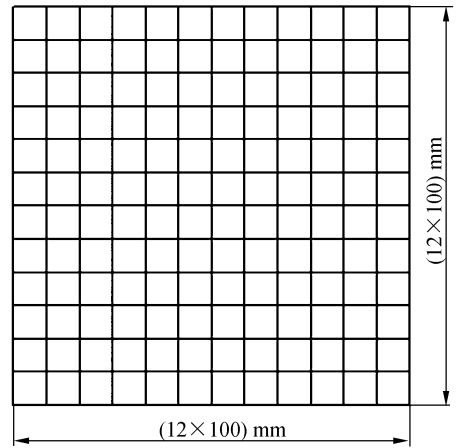


图 5 辐照度测试点

Fig. 5 Measuring points of radiation intensity

## 5 实际技术性能测试结果分析

### 5.1 辐照度测量

采用中科院长春光机所研制的绝对辐射计,

表 1 电源输出功率最大时对应图 5 各测试点的辐照度值

Tab. 1 Radiation intensity values of measuring points corresponding to the Fig. 5 when power output is maximum

1 000.6	1 000.1	995.6	985.6	1 000.4	998.6	995.4	1 000.5	986.3	1 008.2	1 004.6	999.7
1 003.2	1 010.5	987.9	1 008.2	1 005.6	985.2	1 009.8	1 007.5	1 006.9	1 007.4	994.6	986.7
996.7	994.3	999.7	985.6	1 010.3	1 006.4	990.6	1 000.6	987.5	1 011.1	1 007.2	1 000.6
1 000.6	1 014.5	1 000.6	1 007.9	1 000.5	1 000.3	996.7	992.8	989.6	993.2	995.8	995.3
990.4	988.7	993.2	985.6	1 003.6	1 012.3	1 002.2	1 006.4	1 011.9	1 014.3	1 009.7	1 012.5
1 002.8	1 013.4	1 001.2	1 009.5	985.8	999.8	1 011.6	993.5	988.6	993.6	1 012.4	1 010.6
1 003.9	995.3	1 002.3	1 012.2	1 001.6	1 010.7	1 010.8	1 009.2	1 008.7	1 005.4	1 007.3	1 013.4
993.4	997.6	997.6	996.8	987.4	998.6	984.3	985.6	1 014.3	995.7	1 000.6	985.6
1 005.7	983.8	1 000.6	1 000.6	996.3	1 000.4	993.8	1 002.6	1 012.8	985.6	1 000.6	1 014.8
980.8	993.2	1 012.4	985.6	1 000.6	1 003.9	1 000.6	1 008.7	1 007.9	989.2	992.3	994.6
1 000.6	1 000.6	1 000.6	1 005.3	1 010.2	993.6	1 011.4	1 014.6	998.7	1 000.6	1 000.6	1 013.2
1 014.8	1 013.9	1 015.5	1 014.5	1 002.4	1 007.6	1 006.3	1 011.3	1 011.4	1 014.8	955.8	955.8

表 2 电源输出功率最小时对应图 5 各测试点的辐照度值

Tab. 2 Radiation intensity values of measuring points corresponding to the Fig. 5 when power output is minimum

471.5	487.7	487.7	495.2	486.2	487.3	485.2	493.8	465.5	465.5	465.5	465.5
472.9	494.5	476.8	487.7	487.7	487.7	487.7	487.7	488.9	500.2	500.4	486.3
476.3	493.2	499.6	495.3	498.2	496.8	495.5	501.8	487.7	487.7	487.7	487.7
480.3	499.6	495.4	501.7	493.9	497.8	487.7	496.7	500.3	500.8	502.1	492.1
487.7	487.7	487.7	500.6	498.3	496.4	489.6	497.3	494.2	487.7	487.7	487.7
488.6	498.3	496.6	487.7	487.7	487.7	493.7	487.7	493.6	500.8	501.3	484.1
487.2	487.5	487.7	487.7	501.3	500.6	498.6	499.3	489.5	501.3	501.4	488.3
495.1	495.8	498.3	495.5	487.7	487.7	487.7	487.7	487.7	487.7	487.7	487.7
495.3	501.4	500.9	495.3	496.1	499.3	491.8	486.3	496.3	501.4	500.1	483.6
465.5	501.8	502.4	500.2	491.6	494.9	491.6	498.6	498.3	496.3	499.2	465.5
472.9	498.3	496.4	495.5	482.6	500.6	494.3	501.3	487.7	487.7	472.9	472.9
473.9	485.6	488.3	488.3	480.8	482.6	485.3	487.2	485.3	480.3	481.2	479.3

## 5.2 辐照不均匀度的测量

在整个辐照面内,辐照度均匀分布的范围只是其中一部分,这部分称为有效辐照面。在有效辐照面的整个范围内,辐照度随位置变化的最大相对偏差用辐照不均匀度表示,辐照度通常分为面辐照不均匀度和空间辐照不均匀度,这里只要求面辐照不均匀度,按下式计算:

$$\frac{\Delta E}{\bar{E}} = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%, \quad (6)$$

式中  $E$  为辐照度,  $\frac{\Delta E}{\bar{E}}$  为辐照不均匀度,  $E_{\max}$  为辐照面上(或体积内)的辐照度最大值,  $E_{\min}$  为辐照面上(或体积内)的辐照度最小值,  $\bar{E}$  为平均辐照度。

实验数据表明,当电源输出功率最大和最小而积分器距离辐照面距离为 1 m 时,辐照不均匀度分别为 4.65% 和 3.84%。多次测量不同的电源输出功率的辐照不均匀度,该值均小于  $\pm 5\%$ ,参考国标 GB/T12637-90《太阳模拟器通用规范》,该太阳模拟灯阵在辐照不均匀度指标上满足规范 B 级要求,但尚达不到 A 级要求。

## 5.3 辐照不稳定度的测量

辐照稳定度是用辐照度随时间的变化率来表征的,在试验期间定期采集其数据,按下式求稳定度:

$$\frac{\Delta E'}{E'} / T = \pm \frac{E'_{\max} - E'_{\min}}{E'_{\max} + E'_{\min}} \times 100\% / T, \quad (7)$$

式中  $E'_{\max}$  为在被监测时间里辐照度的最大值,  $E'_{\min}$  为在被监测时间里辐照度的最小值,  $T$  为监测时间间隔,单位为 h。

$T$  在公式中不参加除法运算,只表明这个不稳定性是在  $T$  时间里发生的。在有效辐照面范围内任选 3 个位置来测试辐照不稳定性,氙灯通电 25 min 后,辐照度基本稳定后开始测量,每 10 s

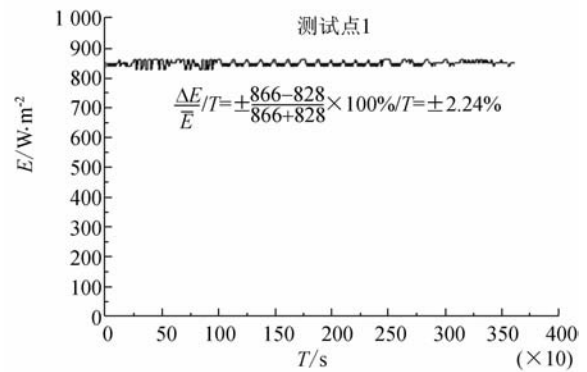


图 6 测试点 1 辐照度变化

Fig. 6 Changing trend of radiation intensity for Measuring point 1

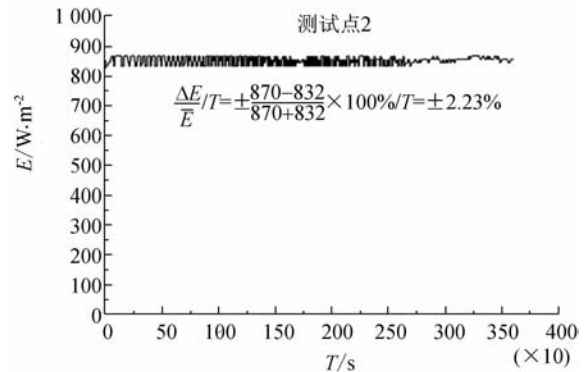


图 7 测试点 2 辐照度变化

Fig. 7 Changing trend of radiation intensity for Measuring point 2

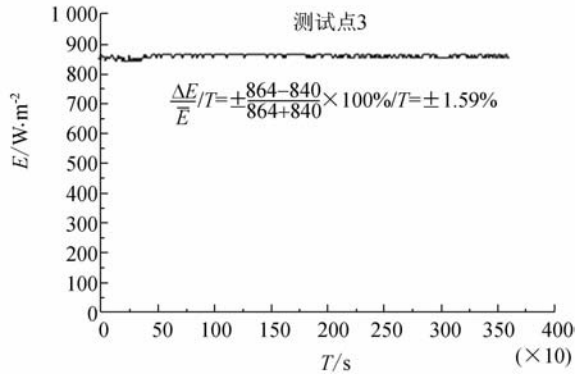


图 8 测试点 3 辐照度变化

Fig. 8 Changing trend of radiation intensity for Measuring point 3

采集一次数据,测试 1 h,得到如图 6、图 7、图 8 所示结果,结果表明多次测量不同辐照度时的稳定

性均小于  $\pm 5\%$ ,参考国标 GB/T12637-90《太阳模拟器通用规范》,该太阳模拟灯阵在辐照不稳定性指标上优于规范 C 级要求,接近 B 级要求,但尚未达到 A 级要求<sup>[15]</sup>。

## 6 结 论

本文研制了真空应用太阳模拟灯阵并对其主要性能进行了测试,解决了太阳模拟灯阵在真空罐内使用时的导热问题,参考国标 GB/T12637-90《太阳模拟器通用规范》,在  $1\ 200\ \text{mm} \times 1\ 200\ \text{mm}$  有效辐照面内其辐照不均匀度满足规范 B 级要求;辐照不稳定性优于规范 C 级要求,接近 B 级要求。辐照度达到  $600 \sim 1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ ,连续可调,各项指标均满足设计目标。

## 参考文献:

- [1] 刘洪波. 太阳模拟技术[J]. 光学精密工程, 2001, 9(2): 177-181.  
LIU H B. Solar simulation technology[J]. *Opt. and Precision Eng.*, 2001, 9(2): 177-181. (in Chinese)
- [2] 王俊, 黄本城, 万才大, 等. 环境模拟技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.  
WANG J, HUANG B CH, WAN C D, et al.. *Environment simulation technology*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [3] EDDY R. Design and construction of JPL SSL5B solar simulator[R]. JPL internal document, 1968-01.
- [4] NAUKAMURA Y, TOMITA T, et al.. 13-m diameter space simulation test facility[C]. *ESA SP-304*, 1990-09: 107-112.
- [5] 庞贺伟, 黄本城, 臧友竹, 等. KM6 太阳模拟器设计概述[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(3): 125-133.  
PANG H W, HUANG B CH, ZANG Y ZH, et al.. Design of KM6 Solar Simulator[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, 23(3): 125-133. (in Chinese)
- [6] 柯受全. 卫星环境工程和模拟试验[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1998.  
KE SH Q. *Satellite environment engineering and simulation experiment* [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1998. (in Chinese)
- [7] 杨林华, 李斌松. 国外大型太阳模拟器研制技术概述[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(2): 162-167.  
YANG L H, LI H S. The development of large solar simulators in the world [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2009, 26(2): 162-167. (in Chinese)
- [8] 张林华, 王元. 全光谱太阳模拟器光源选择的实验研究[J]. 山东建筑大学学报, 2007, 22(6): 531-536.  
ZHANG L H, WANG Y. Experimental study on the selection of light sources for full spectrum solar simulators[J]. *Journal of Shandong Jian zhu university*, 2007, 22(6): 531-536. (in Chinese)
- [9] ASTM E891-87, Standard table for terrestrial direct normal solar spectral irradiance for air mass 1.5 [S].
- [10] ASTM E892-87, Standard table for terrestrial solar spectral irradiance air mass 1.5 for a  $37^\circ$  tiled surface [S].
- [11] 庞贺伟, 黄本城, 臧友竹, 等. KM6 太阳模拟器设计概述[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(3): 125-133.  
PANG H W, HUANG B CH, ZANG Y ZH, et al.. Design of KM6 Solar Simulator[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, 23(3): 125-133. (in Chinese)
- [12] 柯受全. 卫星环境工程和模拟试验[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1998.  
KE SH Q. *Satellite environment engineering and*

*simulation experiment* [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1998. (in Chinese)

- [13] 中华人民共和国国家标准 GB/T12637-1990. 太阳模拟器通用规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.  
National Standard of the People's Republic of China GB/T12637-1990. General specification for solar simulator[S]. Beijing: Standards Press of China, 1990. (in Chinese)
- [14] 仲跻功. 太阳模拟器光学系统的几个问题[J]. 太阳

能学报, 1983, 4(2): 187-193.

- ZHONG J G. On some questions in optical system of the solar simulator[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1983, 4(2): 187-193. (in Chinese)
- [15] 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): 1132-1136.  
WANG Y, ZHANG L H. Design of a new type of full-spectrum solar simulator[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2006, 27(11): 1132-1136. (in Chinese)

#### 作者简介:



苏克强(1983—), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 2003 年于吉林大学获学士学位, 主要从事光学精密机械结构设计和热设计的研究。E-mail: skq207@126.com



王 兵(1964—), 男, 吉林长春人, 研究员, 1986 年于哈尔滨工业大学获学士学位, 主要从事光电对抗领域方面研究。E-mail: wangbing@163.com



陈长征(1976—), 男, 山东德州人, 博士, 副研究员, 2000 年哈尔滨工业大学获学士学位, 2007 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位, 主要从事光机热集成仿真方面的研究。E-mail: may328@163.com



张 军(1962—), 男, 吉林长春人, 工程师, 主要从事光学仪器设计方面的研究。E-mail: zhangjun@163.com

#### 导师简介:



任建岳(1952—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学遥感器的研制和性能评价方面的研究。E-mail: reny@sohu.com