

高精度准直式太阳模拟器光机结构设计

刘 石^{1,2}, 张国玉^{1,2}, 孙高飞^{1,2}, 高玉军³, 王凌云^{1,2}, 王浩君^{1,2}

- (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;
3. 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: 为了实现对卫星控制系统中太阳传感器的高精度地面标定和测试, 提出一种真实模拟太阳光辐射特性的高精度准直式太阳模拟器设计方案, 根据模拟器热功率高的特点, 对氙灯与组合聚光镜、转向平面反射镜、光学积分器等主要组成部分进行了详细的光机结构与热控结构的设计。运用 Ansys 软件进行热学仿真分析, 保证热控结构设计的合理性与最优性。通过实际检测, 设计的太阳模拟器可以真实地模拟太阳光辐射特性, 准直角小于 $32'$, 辐照面小于 $\Phi 100$ mm 时, 不均匀度优于 $\pm 1.6\%$; 辐照面在 $\Phi(100\sim 300)$ mm 时, 不均匀度优于 $\pm 4.2\%$, 满足对高精度太阳传感器的地面标定和精度测试。

关键词: 太阳模拟器; 一个太阳常数; 光机结构; 太阳准直角

中图分类号: V524.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1229-07

Opto-mechanical structure design of collimation solar simulator with high-precision

Liu Shi^{1,2}, Zhang Guoyu^{1,2}, Sun Gaofei^{1,2}, Gao Yujun³, Wang Lingyun^{1,2}, Wang Haojun^{1,2}

- (1. College of Opto-electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement & Control Instruments, Changchun 130022, China;
3. Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to meet the high precision ground calibration and testing of sun sensor in satellite control system, a realistic simulation of solar radiation characteristic of high precision collimated solar simulator design was presented, according to the characteristics of simulator with high thermal power. The main component of the Xenon lamp in combination with the condenser lens, steering plane mirror and optical integrator was designed in detailed structure of the heat-ray control structure. Using Ansys software for thermal simulation to ensure the rationality and optimality of thermal control structure. By the actual detecting, the designed solar simulator can simulate the real characteristics of solar radiation, collimation angle is less than $32'$, unevenness is better than $\pm 1.6\%$ when the irradiation surface is less than $\Phi 100$ mm; unevenness is better than $\pm 4.2\%$ when the irradiation surface is $\Phi(100\sim 300)$ mm, meeting the high precision ground calibration and testing of sun sensor.

Key words: solar simulator; one solar constant; opto-mechanical structure; solar collimation angle

收稿日期: 2014-08-10; 修订日期: 2014-09-12

基金项目: 国家公益性行业科技专项(GYHY200706003, GYHY201006043); 吉林省科技发展计划(20150520093JH)

作者简介: 刘石(1986-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光学设计、航天器地面标定与测试方面的研究。Email: 363860604@qq.com

0 引言

高精度准直式太阳模拟器是用于卫星控制系统中姿态测量关键部件——太阳传感器研制中的一种重要的地面模拟试验与标定设备,其功能是在实验室内模拟真实的太阳辐照度、太阳准直角、太阳光谱特性、辐照稳定性和均匀性等,供星上部件——太阳传感器在地面进行性能测试和精度标定使用。

目前,国内外研制的太阳模拟器,由于技术水平的限制,只能模拟太阳某些方面的特性,而太阳辐照特性中 $32'$ 张角和一个太阳常数的辐照度这两项指标,无法同时实现。从公开报道的文献资料来看,当模拟器的辐照度大于一个太阳常数时,太阳准直角的模拟值通常为 $1^\circ \sim 2^\circ$; 当太阳准直角的模拟值为 $32'$ 时,辐照度一般仅为 $0.1 \sim 0.3$ 个太阳常数。由此可见,标定设备功能的不足,已经大大束缚了太阳传感器测量精度的提高。开展高精度太阳传感器地面标定设备的研究至关重要,它不但影响高精度太阳传感器对卫星的姿态定位精度,并且直接关系到国内航天事业的发展水平^[1-2]。此文结合模拟器热功率高的特点,重点对系统的光机结构进行详细设计,实现了同时模拟真实太阳光准直角和辐照度大于一个太阳常数,并保证了高均匀性。

1 太阳模拟器技术指标

所设计的太阳模拟器主要由模拟器光学系统和模拟器机械系统两大部分组成。根据太阳传感器的高精度地面标定要求,确定高精度准直式太阳模拟器的主要技术指标,如表 1 所示。

表 1 技术指标

Tab.1 Technical index

Technical index	Index parameter
Irradiance	$\leq 1 S_0 (\leq 1 353 \text{ W/m}^2)$
Collimation angle	$32' \pm 1'$
Non-uniformity	$\leq \pm 5\%$
Diameter of irradiation surface	$\Phi 300$

2 太阳模拟器设计

2.1 光学系统设计

太阳模拟器采用同轴透射式准直光学系统,主要由组合聚光镜、短弧氙灯、光学积分器(场镜与投影镜)、光阑、准直物镜组成,图 1 所示为模拟器光学系统。

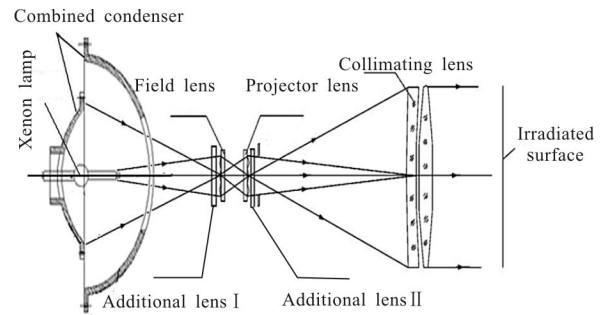


图 1 模拟器光学系统

Fig.1 Optical system of simulator

选取短弧氙灯作为模拟器的光源,将氙灯置于组合聚光镜的第一焦点处,这样由氙灯发出的辐射通量会聚到聚光镜的第二焦点处,形成一个呈高斯形式的照度分布^[3-4],这个分布经过光学积分器的匀光作用后,再经视场光阑和准直物镜以平行光出射,在辐照面上形成一个辐照度均匀的光斑,从而模拟了太阳光辐照^[5-6]。

2.2 整体机械结构

模拟器机械系统主要由氙灯与组合聚光系统调整机构、转向平面反射镜调整机构、光学积分器结构和壳体等组成。图 2 所示为模拟器的机械结构示意图。图中,1 为氙灯调整机构;2 为组合聚光镜调整机构;3 为转向平面反射镜支撑机构;4 为光学积分器结构。

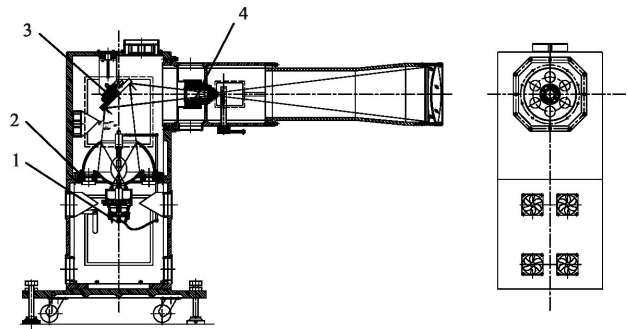


图 2 模拟器机械结构

Fig.2 Mechanical structure of simulator

2.2.1 氙灯与组合聚光镜调整机构设计

氙灯采用垂直的点燃方式,图3所示为氙灯与组合聚光镜调整机构。将氙灯下端部固定到紫铜衬套上,紫铜衬套具有良好的导电性和较好的导热性,再将紫铜衬套安装在六自由度调整架上。氙灯在调整架上,可以实现沿 x 、 y 、 z 方向的13mm的直线移动,同时实现 x 、 y 、 z 方向的 $\pm 5^\circ$ 的角度调整,并在各个方向上具有锁紧功能。图中,1为氙灯调整架;2为阴极衬套;3为聚光镜调整环;4为轴向调整螺钉;5为径向调整螺钉;6为散热孔。

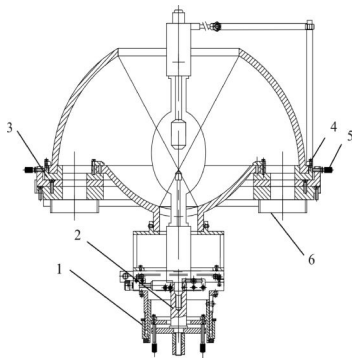


图3 氙灯与组合聚光镜调整机构

Fig.3 Adjusting mechanism for xenon and condenser lens

组合聚光镜由椭球聚光镜和球面反光镜组合而成。要保证聚光镜光轴与光学系统光轴一致,就要求聚光镜能进行水平位置和倾斜角度的调节。利用调整环上的三个径向螺钉推动聚光镜沿 x 、 y 方向实现 ± 5 mm的移动;利用三顶三拉机构完成倾斜角度调整,调整好位置后由调整环的锁紧螺钉锁紧。

组合聚光镜是一个热量集中的位置,容易产生热应力变形,为了很好地解决其热变形的问题,在聚光镜外壁增加环状散热片,可以同时实现聚光镜的散热和增强其强度的功能;并在固定组合聚光镜的圆盘上开数个通风孔,对其进行热控制。图4为组合聚光镜的热控结构图^[9-12]。

利用 Ansys 软件对组合聚光镜温度场进行分析,如图5和图6所示,可以看到在聚光镜第一焦点附近,聚光镜温度较高,聚光镜出瞳口径由于热应力产生了微小收缩,而其底端开口部位几乎没有发生形变,微小形变不会对其光学性能产生影响。

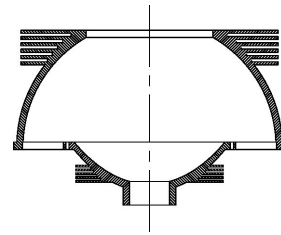


图4 组合聚光镜热控结构图

Fig.4 Condenser lens structure

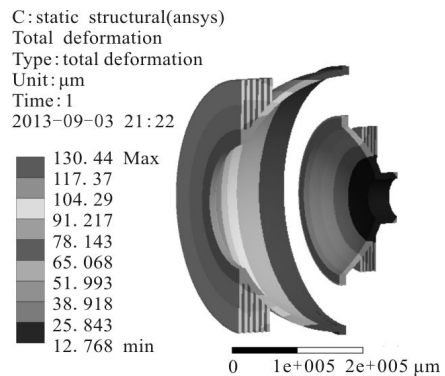


图5 结构变形图

Fig.5 Structural deformation map

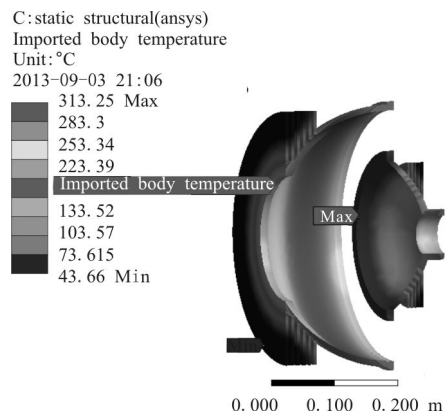


图6 温度极值分布

Fig.6 Temperature extreme value

2.2.2 转向平面反射镜及其支撑结构设计

转向平面反射镜采用实心的单基板,形状是圆柱体。为方便调节,反射镜调整机构采用球冠结构;考虑到反射镜的散热,在其背部加工了导热槽反射镜结构如图7所示^[13-14]。

转向平面反射镜在系统中起着折转光路的作用,对于其支撑结构要便于反射镜的安装和角度的调节,通过反射镜平衡圈上的三个调整螺钉和反射镜调整座的圆锥槽与反射镜的球头配合,使反射镜在槽内实现 $\pm 10^\circ$ 的角度调节。为了防止预紧力过大

使反射镜面发生应力变形,在反射镜与镜座的联接螺钉外部套有弹簧,反射镜支撑装置通过吊架固定在模拟器上箱体壁上。图 8 所示为转向平面反射镜支撑调整机构。图中,1 为小反射镜;2 为调整螺钉;3 为吊架;4 为联接螺钉;5 为预紧弹簧;6 为反射镜调整座。

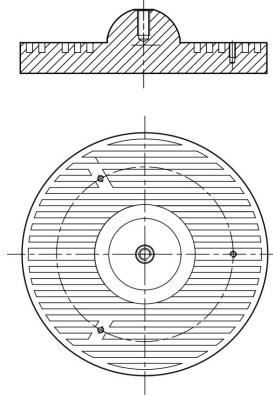


图 7 反射镜结构图

Fig.7 Mirror structure

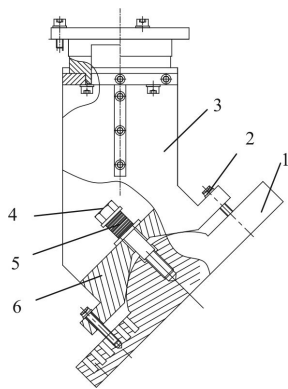


图 8 反射镜支撑调整机构图

Fig.8 Adjusting mechanism for mirror

2.2.3 光学积分器结构设计

光学积分器是太阳模拟器的重要部件,对积分器位置进行调节可以很好地改善辐照面上的均匀性,图 9 所示为积分器结构图。1 为散热器;2 为场镜筒;3 为场镜筒调整垫圈;4 为投影镜筒调整垫圈;5 为投影镜筒;6 为视场光阑;7 为积分器光学系统。光学积分器在整个光学系统中的位置的调整可通过修磨场镜筒调整垫圈厚度来实现;同时为满足场镜组和投影镜组在调试中相对位置可调,其分别安装于场镜筒和投影镜筒内,且位置可通过修磨积

分器投影镜筒调整垫圈厚度来调整。

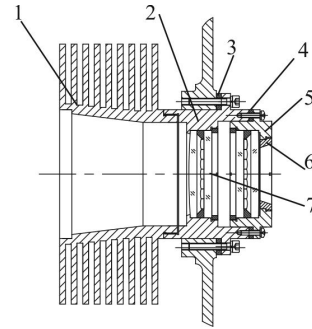


图 9 光学积分器结构

Fig.9 Optical integrator structure

积分器位于模拟器光学系统第二焦点处,热量比较集中,为实时散热其端口配置有空心圆柱翅片型散热器,对于散热器既要考虑散热效果还要实现轻量化的要求,就需要对散热器进行优化设计,这是光学积分器热控结构的关键。

散热器微观热传导模型如图 10 所示。图中①区域表示散热器内表面的热交换,②区域表示散热器外表面与空气之间的热交换。假设进入散热器的热量与传出散热器的热量相等,即 $S_0=S_i$,且整个热传导过程处于稳定的状态。散热器的散热由 S_{Rc} 、 S_{Hc} 、 S_{Dc} 、 S_{Qc} 几部分组成。进入散热器的热量与散热量和出口热量关系如式(1)、(2)所示:

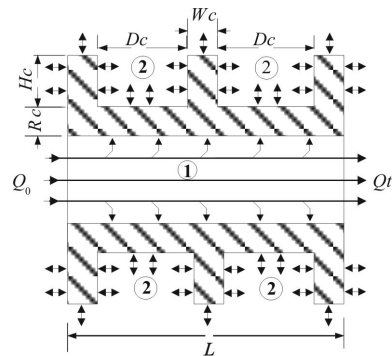


图 10 热传导模型

Fig.10 Heat conduction model

$$S_0=S_{Rc}+S_{Hc}+S_{Dc}+S_{Qc}+S_i \tag{1}$$

$$S_0=S_c+S_i=k \cdot M \cdot h+S_i=k \cdot f_M(R,H,D,W) \cdot h+P_i \tag{2}$$

式中: k 为物质传热系数; m 为物质质量; h 为物质焓值; $f_M(R,H,D,W)$ 为以管厚 R 、片高 H 、片厚 D 和片间距 W 为变量的散热器整体质量。

考虑到散热器所处的位置,要求其质量小于 16kg,散热量最小要高于 11 000 W。给定初始设计参数进行优化,以实现最佳结果。

以散热器的质量 $f_M(x)$ 目标最小,如式(3)所示:

$$\frac{\max}{x \in R} f_M(x) = \max f_M[\rho, v(x)] \leq 16 \text{ kg} \quad (3)$$

式中: $f_M(x)$ 为关于散热器密度 ρ 和体积变量 $v(x)$ 的函数。

通过实际计算,要求散热器的最小散热量 $S_c(x) \geq 11\,000 \text{ W}$, 可表示为:

$$\frac{\min}{x \in R} S_c(x) = \min S_c[k(x), c_i, m(x)] \geq 11\,000 \text{ W} \quad (4)$$

式中: $S_c(x)$ 、 $f_M(x)$ 为目标函数; $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为 n 个优化变量组成的向量组; $k(x)$ 为传热系数; c_i 为①、②区域的热交换系数。

经过优化得到最优解如表 2 所示,分析结果如图 11 所示。优化后整体质量为 13.504 kg,散热量为 11 888 W,满足要求,设计合理。

表 2 结构优化参数

Tab.2 Optimization parameters for structure

Object name	R	H	W	D
Design value/mm	8	55	8	22
Temperature/°C	237.54–320.18			
Mass/kg	13.504			
Heat/W	11 888			

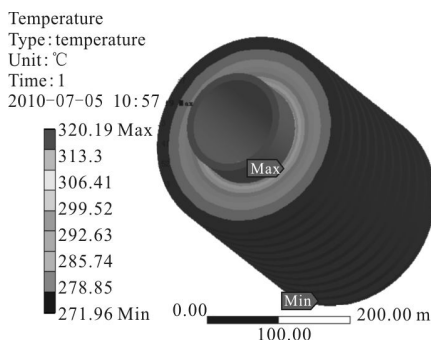


图 11 散热器温度分析结果

Fig.11 Temperature analysis results for radiator

建立积分器温度场模型,汇聚光束经过积分器,温度场分布由中心向边缘、从右向左依次降低。运用

Ansys 软件对所建立的积分器模型进行分析,传热方式为静态空气对流换热,施加正确的对流边界条件后,所分析结果如图 12 所示。积分器镜筒在轴向的最大变形量为 $31 \mu\text{m}$ ^[15-18]。

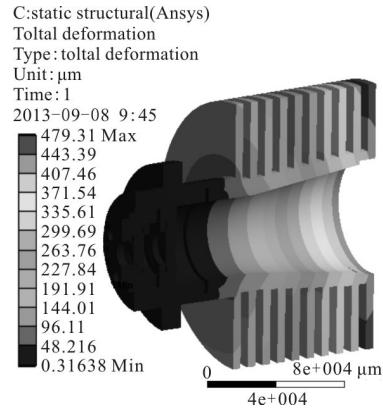


图 12 结构总变形云图

Fig.12 Structural deformation map

3 主要技术指标测试

3.1 不均匀度测试

使用辐照度计对辐照度与辐照不均匀度进行测试,绘制出辐照面上不同半径位置对应的辐照度变化的曲线图,如图 13 所示。根据实际测试数据,得到辐照面上的辐照度与辐照不均匀度如表 3 所示。

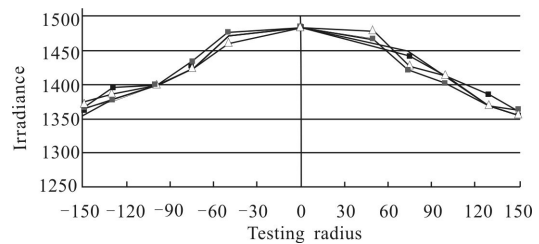


图 13 辐照面相对照度分布曲线

Fig.13 Illuminance distribution curve

表 3 辐照面不均匀度测试结果

Tab.3 Irradiance non-uniformity results

Diameter/mm	Φ 100	Φ 150	Φ 200	Φ 260	Φ 300
Non-uniformity	1.6 %	2.2 %	2.8 %	3.3 %	4.2 %

综上所述,Φ100 内辐照不均匀度为 1.6%,Φ300 内为 4.2%,满足技术指标要求。

3.2 太阳准直角测试

准直角即视场角,测量原理如图 14 所示,其测试结果如表 4 所示。

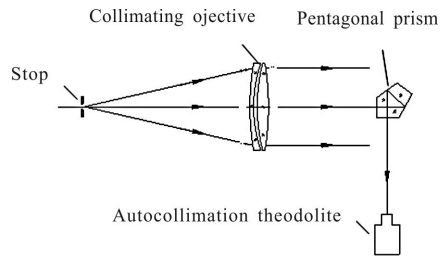


图 14 五棱镜测量准直角原理图

Fig.14 Principle of collimation angle measurement by using pentagonal prism

表 4 准直角测试结果

Tab.4 Collimation angle results

Measuring direction	Theodolite reading	Theodolite reading	Collimation angle
Level	76°31'41"	76°00'17"	31'24"
Vertical	127°42'33"	127°11'00"	31'33"

综上所述,在水平方向和垂直方向进行的测量结果都表明该模拟器的准直角在 $31' \pm 1'$ 范围以内,满足技术指标中光线准直角为 $31' \pm 1'$ 的要求。

4 结论

设计出高精度准直式太阳模拟器光学系统,对氙灯与组合聚光镜、转向平面反射镜、光学积分器等主要组成部分进行了详细的光机结构与热控结构的设计,确保了光学系统功能的实现。经实际测试所设计的太阳模拟器在辐照面小于 $\Phi 100\text{mm}$ 时,不均匀度优于 $\pm 1.6\%$;辐照面在 $\Phi(100\sim 300)\text{mm}$ 时,不均匀度优于 $\pm 4.2\%$ 。并且可以实现 $32'$ 的真实太阳准直角模拟,且辐照度达到一个太阳常数,可以实现对高精度太阳敏感器的地面标定和精度测试。

参考文献:

[1] Zhong Jigong. On some questions in optical system of the solar simulator [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1983, 4

(2): 187-193. (in Chinese)

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.

[2] Zhao Jilin, Zhong Jigong, Chen Xing. The research of the solar simulator [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1981, 2 (4): 417-424. (in Chinese)

赵吉林, 仲跻功, 陈兴. TM-3000A1 太阳模拟器的研究 [J]. 太阳能学报, 1981, 2(4): 417-424.

[3] Powell I. New concept for a system suitable for solar simulation [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(2): 329-334.

[4] Xiang Yanhong, Zhang Rong, Huang Bencheng. Irradiation uniformity simulation of KFTA solar simulator, [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, 23(5): 288-292. (in Chinese)

向艳红, 张容, 黄本诚. KFTA 太阳模拟器辐照均匀性仿真 [J]. 航天器环境工程, 2006, 23(5): 288-292.

[5] Kilmer L C. A more accurate, higher fidelity dual source AM0 solar simulator design [C]//Proc 4th European Space Power Conf, 1995: 671-675.

[6] Huang Bencheng. The large space environmental simulation equipment [J]. *Vacuum Science & Technology*, 1988, 8(6): 379-385. (in Chinese)

黄本诚. KM4 大型空间环境模拟设备 [J]. 真空科学与技术, 1988, 8(6): 379-385.

[7] An Guifang, Zhang Guoyu, Su Shi, et al. Research of the solar simulator for weather sonde experiment [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2011, 32(9): 1408-1412. (in Chinese)

安桂芳, 张国玉, 苏拾, 等. 气象探空仪试验用太阳模拟器研究 [J]. 太阳气象学报, 2011, 32(9): 1408-1412. (in Chinese)

[8] Lu Wenhua Mo Yueqin, Yang Yun. Applications of solar simulator in the calibration and test of radiation instruments [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2001, 12 (2): 196-201. (in Chinese)

吕文华, 莫月琴, 杨云. 太阳模拟器在辐射仪器检测中的应用 [J]. 应用气象学报, 2001, 12(2): 196-201.

[9] Liu Shi, Zhang Guoyu, Sun Gaofei, et al. Design of optical integrator for solar simulator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(4): 467-470. (in Chinese)

刘石, 张国玉, 孙高飞, 等. 太阳模拟器用光学积分器设计 [J]. 光子学报, 2013, 42(4): 467-470.

[10] Liu Shi, Zhang Guoyu, Sun Gaofei, et al. The design of solar simulator in the meteorological radiation calibration system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1345-1349. (in Chinese)

刘石, 张国玉, 孙高飞, 等. 气象辐射标定系统中太阳模拟器

- 的设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1345-1349.
- [11] Zhang Guoyu, Su Shi, Wang Lingyun, et al. Collimated solar simulator and its application in meteorological radiation equipment test [C]//The twelfth session of the Chinese science and Technology Association, 2010: 1-5. (in Chinese)
张国玉, 苏拾, 王凌云, 等. 准直式太阳模拟器在气象计量检定中的应用 [C]//第十二届中国科学技术协会年会(第二卷), 2010: 1-5.
- [12] Kilmer L C. A more accurate, higher fidelity dual source AM0 solar simulator design [C]//Proc 4th European Space Power Conf, 1995: 671-675.
- [13] Chen Jiaqi, Chen Lanfeng, Wang Li, et al. Design and simulation of high-collimating Solar Simulator [J]. *OME Information*, 2011, 28(11): 68-74. (in Chinese)
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.
- [14] Yoder P. Opto-Mechanical System Design [M]. New York: Cooperate Marcel Dekker Inc, 1993.
- [15] Jia Yang, Wan Qiang, Zhang Rong. Thermal design method of solar simulator collimator [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2004, 21(2): 29-38. (in Chinese)
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.
- [16] Zhang Yimo. Application Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [17] Yang Yiqiang, Liu Min. Test of multi-junction solar cell for astronautics and dual light source solar simulator [C]//The Symposium of The 8th Chinese Conference on Solar Photovoltaic, 2004: 107-110. (in Chinese)
杨亦强, 刘民. 航天用多结太阳电池的测试与双光源太阳模拟器[C]//第八届中国太阳能光伏会议论文集, 2004: 107-110.
- [18] Zhang Guozhi. ANSYS10.0 guidance of thermodynamics finite element analysis[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007. (in Chinese)
张国智. ANSYS10.0 热力学有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.