

太阳模拟器的新发展

苏 拾^{1,2} 张国玉^{1,2} 付 芸^{1,2} 王凌云^{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)

摘要 太阳模拟器作为一种重要的试验与测试设备正广泛应用于航天领域和太阳能利用领域。介绍了使用最多的传统型太阳模拟器的结构组成和工作原理, 论述了其优缺点及存在价值。着重叙述了当今涌现的具有代表性的新型太阳模拟器的系统组成和实现形式, 如 LED 太阳模拟器、多光源太阳模拟器、均光棒太阳模拟器、积分球太阳模拟器、光纤传输太阳模拟器和运动式太阳模拟器等。并对它们进行了比较分析, 总结了其发展趋势。

关键词 激光光学; 太阳模拟器; LED; 多光源; 光纤

中图分类号 V524.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.070003

New Development of Solar Simulator

Su Shi^{1,2} Zhang Guoyu^{1,2} Fu Yun^{1,2} Wang Lingyun^{1,2}

¹ School of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
² Engineering Research Center of Photoelectric Measurement and Control Instruments, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Solar simulator as an important test equipment is widely used in the fields of aerospace and solar energy. This paper briefly introduces the structural composition and working principle of traditional solar simulators, and then discusses the advantages, disadvantages and existing value. It also analyzes the new typical solar simulator systems and operation forms, such as LED solar simulator, multiple-source solar simulator, uniform light bar solar simulator, integral sphere solar simulator, optical fiber transmission solar simulator and moving solar simulator and so on. Finally, the characteristics of the solar simulators mentioned above and the development in future are summarized.

Key words laser optics; solar simulator; LED; multiple sources; optical fiber

OCIS codes 230.0230; 250.0250; 080.4228

1 引言

太阳模拟技术是随着空间技术及太阳能利用不断发展起来的一门新兴学科, 主要用于再现太阳辐射的光谱分布、光斑大小、辐照强度、辐照均匀性及稳定性等物理特征和几何特征。

1905 年德国 ATLAS 推出第一台阳光模拟器, 用来测定日光对纺织面料的影响。20 世纪 60 年代, 随着空间技术的发展和需要, 航天大国相继研制各种类型的太阳模拟器对航天器进行模拟试验。如今, 随着太阳能的利用与开发, 人们利用太阳模拟器在室内对各种光伏组件进行性能测试和试验。太阳模拟器得到了蓬勃发展, 在建筑行业中的材料性能老化测试、农业中的良种培育、太阳能电池特性测试、特殊照明、光电材料特性测试、生物化学相关测试、光学催化降解加速研究、皮肤化妆品检测、医用身体保健治疗和环境研究等方面都发挥着巨大应用价值^[1~6]。

随着科学技术的不断进步, 尤其是新技术和新型元器件的广泛应用, 太阳模拟技术也发生了改变, 针对不同用途, 涌现出多种形式的太阳模拟器, 打破了传统的光学结构和实现方式, 出现了 LED 太阳模拟器、均光棒太阳模拟器、积分球太阳模拟器、光纤传输太阳模拟器等, 扩充了太阳模拟器这个大家庭。

2 传统太阳模拟器的组成及工作原理

传统形式的太阳模拟器多采用同轴透射准直式光学结构, 主要由氙灯光源、椭球面聚光镜、光学积分器、

收稿日期: 2011-12-15; **收到修改稿日期**: 2012-01-13; **网络出版日期**: 2012-04-01

基金项目: 国家公益性行业科研专项项目(GYHY200706003, GYHY201006043)和吉林省科技发展计划(20118012)资助课题。

作者简介: 苏 拾(1978—), 男, 讲师, 主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail: sushu@cust.edu.cn

视场光阑、准直透镜组成,如图 1 所示。

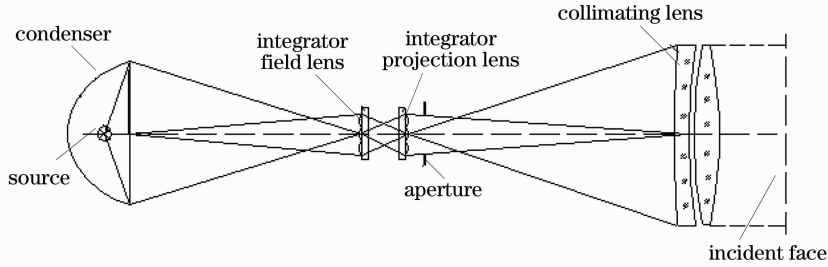


图 1 太阳模拟器工作原理

Fig. 1 Operating principle of solar simulator

椭球面聚光镜将位于第一焦点处光源(短弧氙灯)发出的光束会聚到第二焦点处,并在光学积分器的入射端面(场镜组)形成一个辐照度分布,这个分布经光学积分器各通道对称分割,叠加再成像后经视场光阑和准直镜后以平行光射出,在辐照面上形成一个辐照度均匀分布的照射,这样从准直镜前方看去,辐射光束来自位于准直镜焦面上的圆形视场光阑,如同来自“无穷远”处的太阳,从而模拟了太阳光辐照^[7,8]。

传统形式的太阳模拟器技术比较成熟,精度较高,使用范围广,并已经投入商业化生产。现今小型太阳模拟器主要用于太阳光伏组件和卫星敏感装置的质量考核,大型太阳模拟器主要用于航天器热平衡试验或汽车、飞机等关键零部件的耐热老化测试。但传统形式的太阳模拟器由于受光学结构的限制而体积较大,结构复杂,价格昂贵,另外为了获得高辐照度需要大功率氙灯电源,能量利用率较低;系统的热干扰比较严重,需要良好的散热装置;光谱匹配度有待于提高。由于存在这些不足,只能对太阳的静态光学特征进行模拟^[9,10]。

3 几种新型太阳模拟器

随着科学技术的进步,针对不同用途,人们开始将新技术、新方法和新型元器件不断地应用到太阳模拟器的设计与研制中,打破了传统太阳模拟器的光学结构和实现方式,出现了各种类型的太阳模拟器。

3.1 LED 太阳模拟器

长期以来人们一直使用氙灯作为太阳模拟器光源。氙灯虽然具有高亮度、便于调节、光谱分布接近太阳光谱等优点,但也存在点燃系统复杂、电光转换效率低、长期工作电学性能参数漂移、使用寿命有限等缺点。

随着新型固体照明元件 LED 的出现和应用,由于其结构简单、电光转换效率较高、散热能力强、发光稳定、使用寿命远远长于氙灯、价格便宜等优点,人们开始另辟蹊径利用 LED 取代氙灯作为太阳模拟器的光源。LED 作为太阳模拟器的光源,先后经历了采用纯白色 LED 阵列、红绿蓝(RGB) LED 混合阵列和多颜色可调节光强 LED 混合阵列三个阶段^[11~13]。

2006 年日本东京大学农业与科技部的 Kohraku^[11,12]成功研制出一种离散波长光谱 LED 阵列的新型太阳模拟器,采用波段峰值分别为 470,644,950,570 nm 的蓝、红、红外和白四种颜色 LED。将四种颜色的 LED 集成为一单元,共 14×14 个单元,布置成网格状构成面阵光源,如图 2 所示。最后通过电控系统有序地调节每个 LED 的发光强度,以此来拟合太阳光谱曲线,实物如图 3 所示,其辐照不均匀性为 5%。

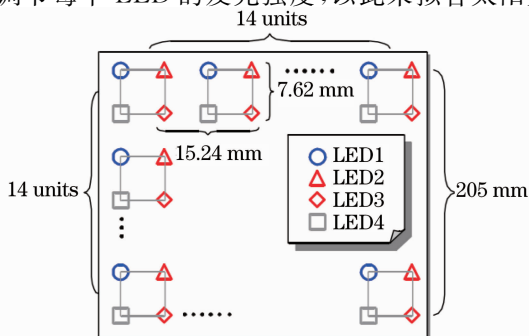


图 2 LED 布置示意图

Fig. 2 LED layout diagram

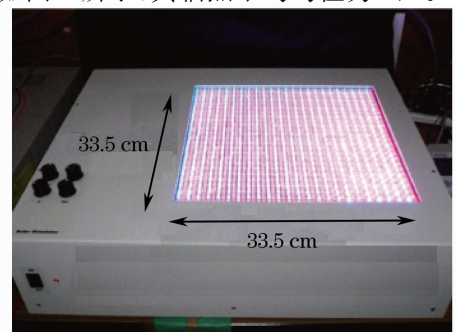


图 3 LED 太阳模拟器实物

Fig. 3 Real LED solar simulator

国内对 LED 太阳模拟器也进行了相关的研究工作。江南大学和尚德能源工程有限公司就进行共同开发,采用白光、L750-OSAU、L850 和 L940-05V 四种 LED 管,根据各波段辐照度占有效波段内总辐照度的百分比以及每个 LED 的谱段和辐照强度,计算出每种 LED 所需的数量。将 54 支白光 LED 管与其余各 20 支峰值波长分别为 750,850,940 nm 的 L750-OSAU、L850 和 L940-05V 三种 LED 共同安装在台形灯室的五块板上,五块板构成灯室顶面 1 与四个侧面 2,分别有序布置四种 LED,下底面为光伏仪器测试平台。其光谱特性满足太阳模拟器 AM1.5 标准光谱分布^[13,14]。

中北大学的周卫华等^[15]提出采用波谱曲线分峰拟合技术确定所选 LED 的波段。首先描点绘制标准太阳光谱曲线,然后用软件对描点图形进行曲线拟合,再根据曲线进行分峰拟合,理论计算出各个分峰的峰值所对应的波长。因此光源系统由波长分别为 530,647,750,810,1066 nm 的 5 种 LED 组成,最后通过光学积分球复合成太阳光谱。图 4 为用软件模拟求得的分峰曲线及数据结果。

另外李果华等^[16]发明了一种由 LED 光源系统、光学混合系统、光谱修正系统和光强校正系统组成新型 LED 太阳模拟器。其中光学混合系统主要由多组棱镜与透镜构成,棱镜主要用来分离各种颜色的光,筛选多余光谱或增强某一光谱,然后由透镜将分散的光混合在一起,实现太阳光的合成。最后由光谱修正系统将复色光进行修正,使其更接近太阳光谱。该模拟器可以说有长足发展,设计日趋合理和完善。

综上所述,如何挑选 LED 种类和数量使其光谱接近真实的太阳光谱,即 LED 复合技术是其模拟技术的关键。另外,在复合基础上采用光学手段进行修正是一种行之有效的方法。

3.2 多光源太阳模拟器

目前没有任何一种光源能够准确地再现真实太阳光谱,从开始的卤素灯、冷光灯到现在使用最多的氙灯以及刚刚出现的 LED,都或多或少的只能模拟光谱曲线的一部分,或者其光谱曲线的某一段与标准光谱曲线有差别。因此国内外出现了多光源太阳模拟器,取长补短用以合成太阳光谱。

日本的 Amoh^[17]研制以汞灯、氙灯和卤素灯三种灯构成太阳模拟器光源。三种灯分别模拟太阳光谱中的紫外区域(UV)、可见光区域(VR)和红外区域(IR)。氙灯滤光片将氙灯光谱截止到 780 nm;卤素灯滤光片将卤素灯光谱 780 nm 以内的光谱截止掉,合成的光谱满足 AM0 标准,辐照强度达 1.4 kW/m²,辐照面积 2.5 m×2.5 m,辐照不均匀度 15%。

美国的 Bennett 等^[18]介绍了由短弧氙灯和卤钨等组成的太阳模拟器,其合成的光谱范围在 320~1000 nm,更加接近真实的太阳光谱。

为了更好地模拟太阳光谱,中国航天科技集团公司五一四所提出一种由氙灯、钨灯组成的,光强和光谱均可调节的双光源太阳模拟器^[19],其光路原理如图 5 所示。氙灯光谱经红外截止滤光片去掉了 700 nm 以上的红外谱段成份和其中强烈的线光谱,再经过冷光镜反射提供了模拟器光谱的紫外和可见光成分;同时钨灯光线经透红外滤光片和冷光镜则提供了模拟器光谱的红外成分。两路光叠加后可产生与标准 AM0 阳光光谱十分接近的光谱分布,如图 6 所示。

通过调节氙灯和钨灯的光强改变双光源太阳模拟器的光强和光谱,而且采用不同透射率的滤光片和冷光镜还可模拟不同标准的太阳光谱。因此,欧、美的一些航天太阳能电池的测试机构,尤其是航天用多结太阳能电池的研究和生产机构,使用这种双光源太阳模拟器来测试两结和三结太阳能电池的光电转换效率并获得了比较准确的数据^[20~22]。

3.3 具有新型匀光器的太阳模拟器

传统光学形式的太阳模拟器以其精度高、技术比较成熟仍广泛应用于相关行业中,但是其中一个突出问题是如何改善其辐照度不均匀性。光学匀光器对辐照度不均匀性起着决定性作用,如何设计更好的匀光器是对传统太阳模拟器进行研究的重点。

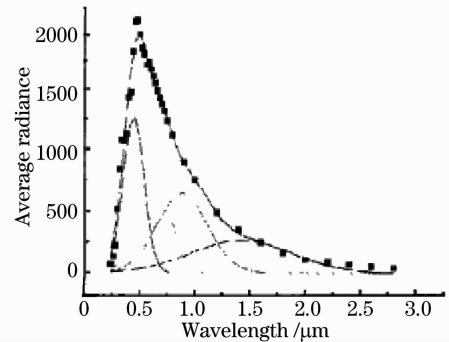


图 4 软件模拟结果

Fig. 4 Software simulation results

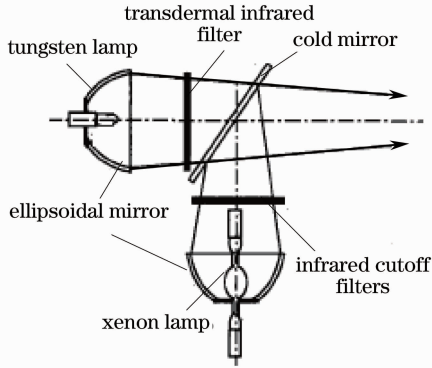


图 5 双光源太阳模拟器的光路原理图

Fig. 5 Principle diagram of optical path of solar simulator with two light sources

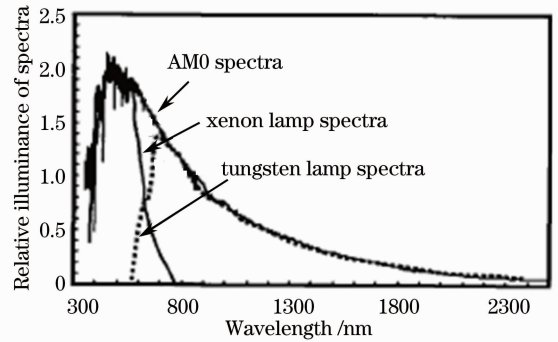


图 6 双光源太阳模拟器光谱和 AM0 标准光谱比较

Fig. 6 Comparison of the spectra between solar simulator with two light sources and AM0 standard spectra

哈尔滨工业大学王素平等^[23]提出了采用匀光棒作为匀光器改善辐照面的均匀性。整个光学系统类似传统太阳模拟器的光学系统,不同之处是采用匀光棒代替现有复杂的光学积分器作为匀光器。如图 7 所示,匀光棒为多边形玻璃柱体,放置在椭球聚光镜的第二焦点上,将由椭球聚光镜会聚的光线经过多次反射成像,在后端面重合,得到一个均匀的输出,最后经准直透镜以平行光形式照射到辐照面上。

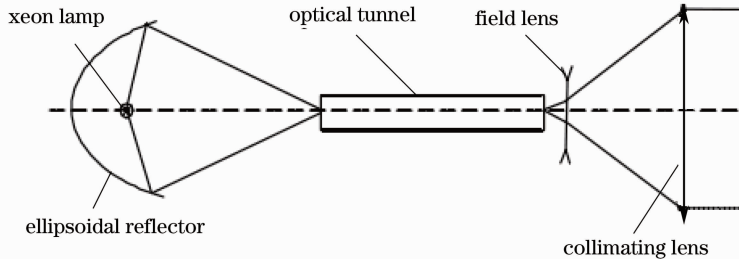


图 7 匀光棒光学系统

Fig. 7 Optical system of uniform light stick

在光束进入匀光棒前端时,光能成高斯分布,中心光能高外围光能较小,且对应一个很大的立体角。在玻璃棒的出口表面上,圆形的发散光被反射分割为许多亚多边形表面,每个表面等于玻璃柱体的截面,在玻璃柱体的出口表面上,这些亚多边形表面在中心重叠,形成有多边形截面的光,增加重叠的小多边形表面的数目,可以得到更均匀的照明。通过对二边、四边、五边、六边和八边形等几种面型光棒的光辐照度均匀性对比分析和理论计算,发现增大椭球面聚光镜的会聚角,增加匀光棒长度和面型个数,提高光源像的反射次数能够获得更好的均匀性。

采用匀光棒的太阳模拟器相比以往的光学积分器结构简单、加工容易、造价低廉,而且其能量利用率、辐照强度、辐照均匀性都有较大的提高。另外菲涅耳透镜、复眼透镜和自由曲面反射器等新型匀光器件的出现也为太阳模拟器光学系统结构优化拓展了新的思路^[24]。

3.4 积分球太阳模拟器

辐照均匀度是太阳模拟器关键的性能指标之一,如何提高均匀度也是研究中的难题。最近北京卫星环境工程研究所提出了一种能够更好地获得均匀性的新方法,研制出一种用于对卫星遥感辐射定标的积分球太阳模拟器,主要由积分球、聚光系统、光阑控制系统、光谱校正及测量系统组成^[25,26]。采用氙灯和溴钨灯的双光源方式,用滤光片对光源光谱进行截止和校正。将氙灯波长大于 $0.8 \mu\text{m}$ 的谱域截止掉,而由溴钨灯辐射来模拟太阳波长大于 $0.8 \mu\text{m}$ 的谱域。利用由两个半球组成、内壁涂有聚四氟乙烯漫反射材料的积分球,将两种光源合成太阳光谱并均匀化,在出口形成一个朗伯光源。通过能量计算确定了两只灯的功率大小。光阑控制系统使积分球出射口的辐亮度从最大值按照 10% 递减,线性输出 10 档辐亮度值。这种模拟器结构简单,能量转换效率较高。由于采用积分球对入射光谱进行合成并进行均匀处理,因此获得的辐照度的均匀性和稳定性都较高,合成的光谱符合国际照明委员会测定的太阳光谱分布曲线及均匀性指标要求。

采用积分球是提高模拟器辐照不均匀性的一个很好的手段。

3.5 光纤太阳模拟器

将光导纤维技术应用到太阳模拟器的光束传输与耦合中,提高其光谱匹配度和辐照均匀性^[27]。美国 Newport 公司研制开发的主要由光源系统、滤光系统和光导纤维系统组成的 96000 型太阳模拟器,就是利用光纤光束进行传递,产生直径为 3 mm 的太阳模拟辐射光斑。另外美国的 Sopori 等^[28]也研制了一种利用光纤进行传输和耦合用的光纤太阳模拟器^[28],它具有氙灯和钨光灯两个光源,如图 8 所示。为了有效利用氙灯,通过椭球反射镜、平面反射镜、透镜组和滤光片 F_1 、 F_2 从氙灯一个光源中提取紫外光和可见光两个谱段,其中 F_1 和 F_2 均为低通滤光片,能阻挡强烈的发射线区域。钨光灯没有设置滤光片,主要提供红外谱段。三束不同谱段的光束分别通过控制光束功率的光阑 A_1 、 A_2 和 A_3 ,以调整光谱分布,更真实地模拟太阳光谱。然后三束光各自的透镜组 L_1 、 L_2 、 L_3 将光聚焦在相应的三束光纤电缆末端。光纤电缆的红外线和可见光分支由玻璃纤维组成,而紫外线分支则由分散在玻璃机体中的熔融石英纤维组成。玻璃纤维和石英纤维的直径分别为 $25.4\ \mu\text{m}$ 和 $50.8\ \mu\text{m}$ 。光纤组合这些光束产生一束由线性重叠的输入光束组成的输出光束。光纤的随机排列特性确保光纤输出的光束中每束光的强度分布相同。光束穿过光纤电缆共有分支,从输出孔 A_0 输出,并经透镜组 L_0 准直照射到工作面上。光纤电缆由 6000 根光纤组成,每根光纤相当于光学积分器的一个元件,相当于 6000 个光学元件集成对辐照进行均匀化处理,因此均匀性高。

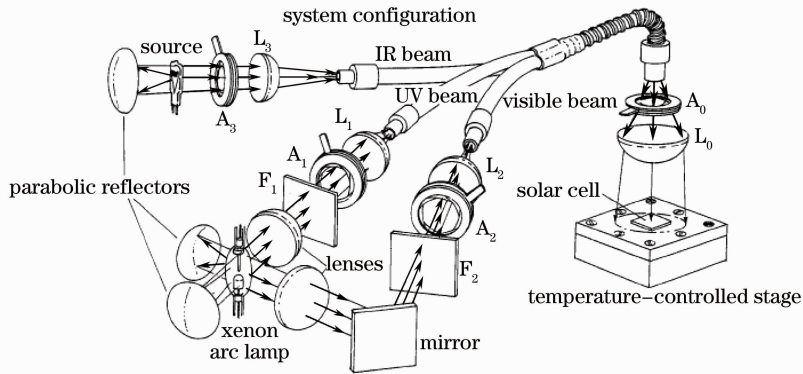


图 8 光纤太阳模拟器主要系统组成

Fig. 8 Schematic of the optical fiber solar simulator showing major elements of the system

3.6 动态太阳模拟器

为了测试需要改变输出辐照的照射方向,因此在传统太阳模拟器结构的基础上安装运动机构。比如对太阳能集热器进行试验时,美国的 Zerlaut 等^[29]发明了一种具有纵向、横向和俯仰运动机构的太阳灯阵。灯阵安装在龙门起重机上,通过链条调整灯阵的纵向位置;通过脚轮调整灯阵横向位置;通过俯仰机构调整灯阵倾斜角度照射到太阳能集热器上。

在卫星环境工程试验中,对星上姿态测量关键部件太阳敏感器进行参数标定和性能测试,需要太阳模拟器不仅能模拟太阳静态光学特征还具有动态运动轨迹特征,即在室内实现太阳目标的仿真,使模拟光斑沿程序控制的轨迹运动,给卫星姿态控制系统内的太阳敏感器提供太阳光模拟信号。

长春理工大学先后研制了卫星物理仿真试验用运动式太阳模拟器和自主导航试验用太阳模拟器。在光路中增加方位与俯仰运动机构,分别位于光学积分器与小反射镜之间和大、小反射镜之间,如图 9 所示。运动机构主

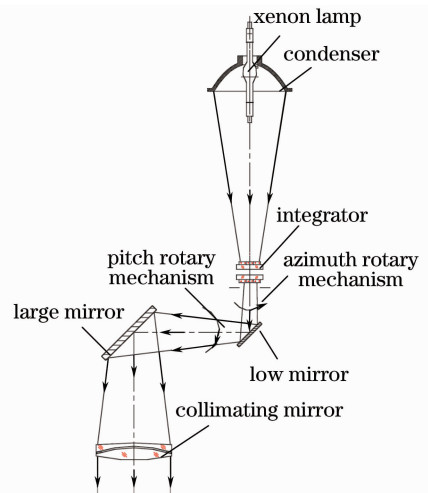


图 9 运动式太阳模拟器光学系统布局

Fig. 9 Overall layout of optical system of moving solar simulator

要由步进电机、蜗轮蜗杆、圆感应同步器测角组成闭环控制系统,在采用图形化编程语言 Labview 所编制的程序控制下,精确调整辐照方向或模拟光斑运动轨迹,所设计的太阳模拟器运行平稳,方位和俯仰角控制精度达到 0.02° ,并在航天器姿态测量部件的地面模拟试验和标定中得到应用^[30~32]。

传统太阳模拟器以及后来出现的 LED、多光源、新型匀光器、积分球和动态太阳模拟器各自有优缺点,现对它们的性能及应用进行比较,如表 1 所示。

表 1 几种类型太阳模拟器比较

Table 1 Comparison of several types of solar simulators

Type of solar simulator	Spectrum matching	Irradiation		Useful life	Technology application	Application
		Stability	Uniformity			
Traditional type	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate		Solar energy and aerospace
LED	Poor	Good	Good	Long	LED	Solar energy
Multiple-source	Good	Poor	Moderate	Moderate	Xenon lamp, tungsten halogen lamp	Solar energy and aerospace
New dodging device	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate	Quadrilateral rod, Fresnel-lens, etc.	Not yet in application
Integral sphere device	Good	Good	Good	Moderate	Integral sphere	Solar energy and aerospace
Optical fiber	Good	Moderate	Moderate	Moderate	Optical fiber	Solar energy
Moving type	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate	Motion mechanism	Solar energy and aerospace

4 结束语

新型太阳模拟器的出现从性能指标、功能和实现形式上都发生了根本性变化,归纳起来有以下几点发展趋势:

1) 光源选择上有了更广阔的空间。

打破以往用单一的氙灯作为光源的不足,采用多种光源进行合成的方法取长补短,提高光谱匹配度。另外,随着新型发光器件 LED 的出现和应用,LED 太阳模拟器以其稳定性好、使用寿命长、光电转换效率高等优势逐渐被人们重视,但在各种类型 LED 复合技术上还有待提高,以模拟出更加真实的太阳光谱。

2) 提高辐照不均匀度有了更好的方法。

比如在光学设计上,匀光棒、菲涅耳透镜的出现打破了以往使用光学积分器的固定模式,为人们在匀光器结构的选取和设计上扩展了新思路。光学积分球的应用为提高辐照均匀性提供了一种有效手段。

3) 应用光纤技术。

光导纤维的应用改变了模拟光束的传输方式,尤其将几种光源进行耦合成为可能,并且高数量的光纤电缆对提高辐照均匀性也起到了较好的作用。

4) 从静态模拟发展到动态模拟。

在太阳模拟器光路中增加回转机构可以改变输出光束的照射方向,从以往的太阳静态光学参数的模拟发展到能模拟一日或一年四季的太阳光斑运动轨迹,在卫星环境工程的动态仿真试验中可发挥巨大作用。

参 考 文 献

- Gao Yan, Liu Hongbo, Wang Li. Solar simulation technology[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(2): 104~111
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
- Yu Rongjin. Optics and solar energy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1751~1755
于荣金. 光学与太阳能[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1751~1755
- Ke Shouquan. *The Environmental Engineering and Simulation Test of the Satellite* [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1998

- 柯受全. 卫星环境工程和模拟试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1998
- 4 R. Eddy. Design and construction of the JPL SS15B solar simulator[C]. Third Space Simulation Conference, 1968. 22~35
- 5 D. S. Ross, M. D. Wardle, D. M. Taylor. A thermal vacuum-UV solar simulator test system for assessing microbiological viability[C]. Eighth Conference on Space Simulation, 1975. 711~721
- 6 F. Naggamine. New solar simulator for multi-junction solar cell measurements[C]. 23th IEEE PV Specialists Conf. , 1993. 686~690
- 7 Zhao Jilin, Zhong Jigong, Chen Xing. The research for the solar simulator TM-3000A1[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 1981, **2**(4): 417~424
- 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
- 8 Peng Xiaojing, Xu Lin, Guo Ze. The spectral calibration of the class A solar simulator[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2008, **29**(11): 1324~1327
- 彭小静, 徐林, 郭泽. A 级太阳模拟器的光谱校正[J]. 太阳能学报, 2008, **29**(11): 1324~1327
- 9 Chen Dahua. The technical characteristic and application of xenon lamp[J]. *Lamps & Lighting*, 2002, **4**(2): 18~20
- 陈大华. 氙灯的技术特性及其应用[J]. 光源与照明, 2002, **4**(2): 18~20
- 10 Zhu Zhenmin, Qu Xinghua, Liang Haixing *et al.*. Uniform illumination study by light emitting diode ring array and diffuse reflection surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0115001
- 祝振敏, 曲兴华, 梁海星等. 基于发光二极管环形阵列与漫反射表面的均匀照明光源研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0115001
- 11 Shogo Kohraku. New methods for solar cells measurement by LED solar simulator[C]. The 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. 1977~1980
- 12 Shogo Kohraku. A fundamental experiment for discrete-wavelength LED solar simulator[J]. *Sol. Energ. Mat. Sol. C*, 2006, **90**(18-19): 3364~3370
- 13 Yin Luqiao, Yang Weiqiao, Li Shuzhi. Dynamic color temperature white lighting source based on red green and blue light emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0523004
- 殷录桥, 杨卫桥, 李抒智. 基于三基色的动态色温白光发光二极管照明光源[J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0523004
- 14 Gao Liang, Li Guohua, Meng Zhaoyuan. The design of LED solar simulator[C]. The Symposium of the 10th Chinese Conference on Solar Photovoltaic, 2008. 751~756
- 高亮, 李果华, 孟昭渊. LED 太阳模拟器的设计[C]. 第十届中国太阳能光伏会议论文集, 2008. 751~756
- 15 Zhou Weihua, Zhou Hanchang. Study of LED solar simulator[J]. *Infrared*, 2009, **30**(3): 46~48
- 周卫华, 周汉昌. LED 太阳模拟器的研究[J]. 红外, 2009, **30**(3): 46~48
- 16 Li Guohua, Qian Weiyang. Study of LED Solar Simulator[P]. China Patent, 200810025522.1, 2008
- 李果华, 钱维莹. LED 太阳模拟器[P]. 中国专利, 200810025522.1, 2008
- 17 Hiroshi Amoh. Design for a multi solar simulator[C]. SPIE, 2004, **5520**: 192~199
- 18 M. Bennett, R. Podlesny. Tow-source simulation for improved solar simulation[C]. 21st IEEE PV Specialists Conf. , 1990. 1438~1442
- 19 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
- 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
- 20 C. Dominguez, I. Anton, G. Sala *et al.*. Characterization of a new solar simulator for concentrator PV modules[C]. 4th International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen, 2007
- 21 I. Powell. New concept for a system suitable for solar simulation[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(2): 329~334
- 22 L. C. Kilmer. A more accurate, higher fidelity dual source AM0 solar simulator design[C]. 4th European Space Power Conf. , 1995. 671~675
- 23 Wang Suping, Lin Jianbo, Liu Liwei *et al.*. Simple lighting system applied to the solar simulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(9): 32~34
- 王素平, 凌健博, 刘立伟等. 一种应用于太阳仿真器的照明系统设计[J]. 光电工程, 2006, **33**(9): 32~34
- 24 Ding Yi, Gu Peifu. Free form reflector for uniform illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 540~544
- 丁毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器[J]. 光学学报, 2007, **27**(3): 540~544
- 25 Yang Linhua, Yan Dayuan, Shi Ruiliang. Research of integrating sphere solar simulating source [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2005, **22**(2): 116~119

- 杨林华, 闫达远, 史瑞良. 积分球太阳辐照模拟源的研制[J]. 航天器环境工程, 2005, **22**(2): 116~119
- 26 Yang Benyong, Zhang Liming, Chen Hongyao. System design of the integrating sphere used for on board calibration of visible-SWIR hyperspectral remote sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3545~3550
- 杨本永, 张黎明, 陈洪耀. 可见-短波红外高光谱星上定标用积分球系统的设计[J]. 光学学报, 2009, **29**(12): 3545~3550
- 27 Lu Huaiwei, Wei Yun, Wu Kaijun *et al.*. Design of all-fiber asymmetric interleaver with 2×2 and 3×3 fiber couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1106002
- 鲁怀伟, 魏 贇, 邬开俊 等. 基于 3×3 和 2×2 光纤耦合器的全光纤不等带宽梳状滤波器的设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(11): 1106002
- 28 B. L. Sopori, C. Marshall. Design of a fiber optic based solar simulator[C]. IEEE Conf. Photovoltaic Specialists, 1991, 783~788
- 29 Gene A. Zerlaut, William T. IDokos, William J. Putman *et al.*. Solar Simulator and Method[P]. United States Patent, 4423469, 1983
- 30 Su Shi, Xu Xiping, Zhang Guoyu *et al.*. The research of slewing mechanism system for solar simulator[J]. *J. Changchun University of Science and Technology*, 2011, **34**(2): 24~27
- 苏 拾, 徐熙平, 张国玉 等. 太阳模拟器回转运动系统研究[J]. 长春理工大学学报, 2011, **34**(2): 24~27
- 31 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, 安志勇, 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
- 32 Chen Jiacheng. Study on Control System of the Solar Simulator:[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008
- 陈加成. 太阳模拟器控制系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008