文章编号:1008-1542(2015)06-0619-06 doi:10.7535/hbkd.2015yx06011

太阳模拟器光源离焦对光斑的影响分析

张嘉钰,窦建秦,牛虎利,常 笑

(河北科技大学机械工程学院,河北石家庄 050018)

摘 要:针对聚焦型太阳模拟器光源离焦量与光斑辐照度的关系开展了研究,以聚焦型太阳模拟器光学系统为研究对象,根据某型号的短弧氙灯及其椭球聚光镜进行模拟计算,依据氙灯能量分布图及其配光曲线,将发光体简化为两端不发射光线、侧面发射光线的柱形发光体。在光学模拟软件TracePro中将简化的发光体及其椭球聚光镜进行建模,主要模拟光源轴向及其径向离焦对光斑的影响。结果表明,光源离焦对光斑辐照度平均值影响不大,但是对光斑辐照度的最大值、光斑辐照度分布形式、光斑面积有很大的影响。依据以上分析结果可以为太阳模拟器调焦系统方面的设计提供理论上的数据参考,对该类型的太阳模拟器装调也具有指导意义。

关键词:应用光学;太阳模拟器;光源离焦;光学系统;调焦系统

中图分类号:TK51 **文献标志码**:A

Analysis of influence on the solar simulator light source off-focus to the spot

ZHANG Jiayu, DOU Jianqin, NIU Huli, CHANG Xiao

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: Aiming at focusing-type solar simulator, the paper researches the relationship between the defocusing amount and the facula irradiance. With the optical system of focusing-type solar simulator as research object, simulation is conducted based on a short-arc xenon lamps and its ellipsoidal condenser. According to the xenon lamp energy distribution figure and its distribution curve flux, the luminous body is simplified to cylindrical luminous light which emits light only on the flank. Model for the simplified luminous light and its ellipsoidal condenser are established in the optical simulation software TracePro, and the impact of axial and radial deviation on the facula is simulated. The results show that light off-focus has little influence on the average of facula irradiance, but has great influence on the maximum value and the distribution of facula irradiance as well as the facula area. The result provides a theoretical reference for the design and alignment of solar simulator focusing system.

Keywords: applied optics; solar simulator; light source off-focus; optical system; focusing system

太阳模拟器分为准直型太阳模拟器和聚焦型太阳模拟器[1-3]。前者的特征是在较大辐照面积内提供与太阳光谱分布相匹配的、均匀的、准直稳定的太阳光辐照,主要用来测试太阳电池光伏特性和收集太阳光能;

收稿日期:2015-06-16;修回日期:2015-07-10;责任编辑:陈书欣
基金项目:河北省教育厅青年基金(Q2012073)
作者简介:张嘉钰(1966—),男,天津人,教授,主要从事机电一体化、CAD/CAM方面的研究。
E-mail:zhangjyv@163.com

张嘉钰,窦建秦,牛虎利,等.太阳模拟器光源离焦对光斑的影响分析[J].河北科技大学学报,2015,36(6):619-624.
ZHANG Jiayu, DOU Jianqin, NIU Huli, et al. Analysis of influence on the solar simulator light source off-focus to the spot[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(6): 619-624.

后者的特征是在较小辐照面积内获取极高的辐射通量，主要应用于测试部件材料的高热特性和热化学特性[4-8]。

太阳模拟器的辐照光斑参数是评价设备性能的重要依据，而光源的离焦量又对辐照光斑的能量分布有着重要影响[9]，实际情况中人们无法将光源精确安装在聚光镜的焦点位置，所以进行光源离焦量对光斑参数影响的分析对太阳模拟器光学系统的设计有着重要的参考价值。本文正是基于以上原理，通过对某型号聚焦型太阳模拟器光源离焦量与光斑参数的关系开展了研究，利用 TracePro 光学仿真软件对光源三维方向的离焦量进行模拟，及其对应的辐照光斑数据进行分析，为太阳模拟器调焦系统方面的设计提供理论上的数据参考。

1 太阳模拟器光学系统组成及其工作原理

聚焦型太阳模拟器光学系统采用光谱能量分布和太阳光谱相近，具有较高的发光效率的短弧氙灯作为光源[10-13]；通常采用椭球面聚光镜作为聚光单元，因为它具有将位于椭球聚光镜第一焦点 F_1 处的光源发出的光束汇聚到椭球面聚光镜第二焦点 F_2 处的特点，满足高精度汇聚光斑的要求[14-18]。

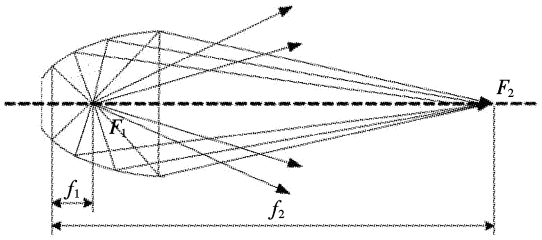

图 1 聚光原理示意图

Fig. 1 Condensing schematic

图 1 表示氙灯光源经过椭球聚光镜反射汇聚至第二焦点的示意图。该光学系统采用 1 000 W 的短弧氙灯作为光源，水平安装[19]。椭球面聚光镜 $f_1=33.78$ mm，焦距 $f_2=541.78$ mm，前开口直径 224 mm，后开口直径 50 mm。

2 光源离焦对光斑的影响

2.1 光源的简化

表 1 为光源具体参数，氙灯极间距为 5 mm，根据短弧氙灯的发光特点可知(图 2)，短弧氙灯光弧位于两极之间，光弧长度为两极间距，弧光中心位于阴极附近，能量主要集中在阴极斑附近，长度约为 2 mm，直径约为 1.5 mm。

表 1 光源参数

Tab. 1 Light source

功率/W	电源电压/V	工作电压/V	工作电流额定值/A	使用范围/mm	全长/mm	安装长度/mm	外径/mm	光中心高/mm	极间距/mm
1 000	>65	22	45	30～45	320	275	43	125	5

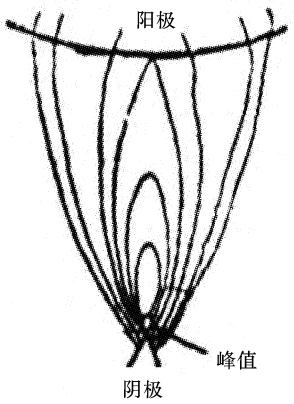

图 2 氙灯能量分布图

Fig. 2 Xenon lamp energy distribution

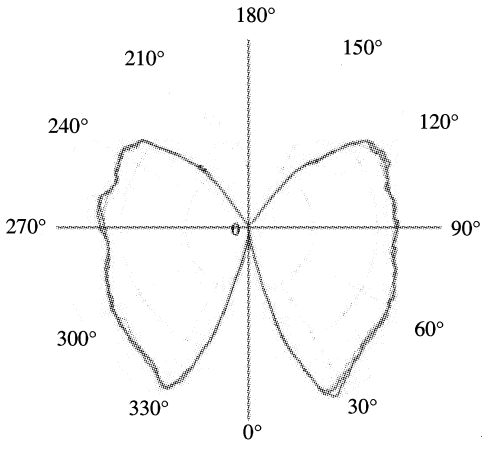

图 3 氙灯配光曲线

Fig. 3 Light distribution curve

图 3 为短弧氙灯配光曲线图，该图表示了氙灯阴、阳极轴线所在平面内的能量分布情况，原点位置为阴极端点，0°，180°极轴为阴、阳极所在轴线，180°方向为阴极，0°方向为阳极。由图 3 可知，135°到 225°和 330°到 30°范围内基本没有光线发出，因此，在计算模型中氙灯光弧可简化为直径 1.5 mm、长度 2 mm、以两极轴线为中心的圆柱体，圆柱体两端面不发射光线，侧面发射光线[20]。

2.2　模型的构建

目前光学系统分析软件主要有 TracePro，LightTools，在研究过程中，采用以蒙特卡洛光线追迹法为理念的 TracePro 对光源的发光效果进行模拟[21-22]。首先在软件中以计算好的模型数据进行建模，然后对光源的发光参数和反光表面的材料属性进行设定，最后利用软件自身的光线追迹便可在指定距离处的聚光屏上得到如图 4 所示的光斑能量图。从图 4 中可以看出，在不考虑光源离焦的情况下，光斑的能量分布梯度均匀，光斑能量主要分布在直径为 32 mm 的圆内，辐照度最大值为 2.1×10^6 W/m^2，平均值为 3.0×10^5 W/m^2。

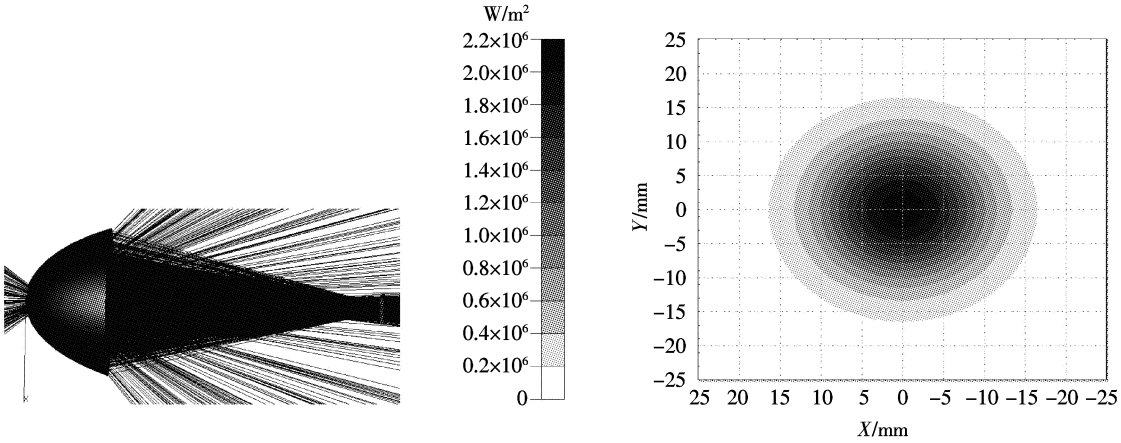

图 4　辐照度分布图

Fig. 4　Irradiance distribution

实际情况中，由于各种误差因素的存在，无法将氙灯光源准确安装在理论焦点位置，或多或少都会有所偏离，很难达到图 4 软件模拟出的效果，本文模拟光源离焦量对光斑的影响，为太阳模拟器光学调焦系统的设计提供数据参考。

2.3　模拟测试

在模拟计算中将简化的圆柱光源中心放置在椭球聚光镜第一焦点 F_1，作为安装的初始位置，位移为 0。由于安装误差的不确定因素，不可能将所有方向误差因素都进行模拟，选取轴向和径向离焦对光斑的影响进行分析，假设沿轴向的聚光方向为正向，反之为负向。利用 TracePro 模拟光源偏离聚光镜焦点对光斑进行分析。

根据几组模拟出的数据对比，本文对于轴向光源离焦数据的模拟设定聚光屏为 50 mm 的正方形面，聚光屏正好处于第二焦点 F_2，设定光源离焦量为±2 mm。

由图 5 和图 6 可知：正向离焦时，聚光屏辐照度最大值起始平稳，0.6 mm 离焦量后会平滑下降；辐照度平均值会有微量的下降；光斑直径呈现增大趋势，离焦 1.4 mm 以后直径没有变化。这是由于光源离焦导致光线分散使得聚光屏接收入射光线分散带来的变化；当负向离焦时，聚光屏辐照度最大值会快速下降，而辐照度平均值几乎没有变化，光斑直径稳定增加，在聚光屏上会形成一个中心与外侧辐照度低，中间呈环状的高辐照度区域，如图 7 所示（依次选取－0.4，－0.8，－1.2，－1.6，－2.0 mm 离焦量），这种辐照光斑的变化在正向离焦过程中并没有产生，要防止这种情况的发生，也可以利用微小负向离焦产生顶端辐照度均匀良好的现象（例如－0.8 mm 离焦量处辐照度峰值曲线平稳）来进行合适的实验测试。

对于径向光源离焦数据的模拟，同样设定聚光屏为 50 mm 的正方形面，由于径向离焦光斑的对称性变化，只选取一侧 2 mm 离焦量进行数据模拟。

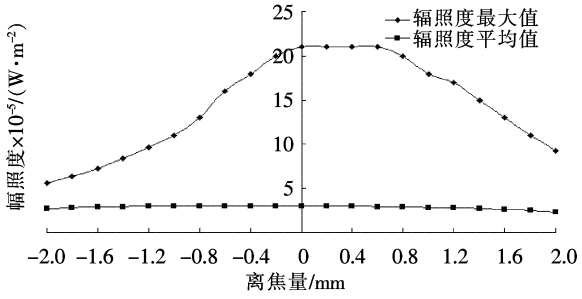

图5 光斑辐照度与离焦量关系

Fig. 5 Irradiance relationships with off-focus

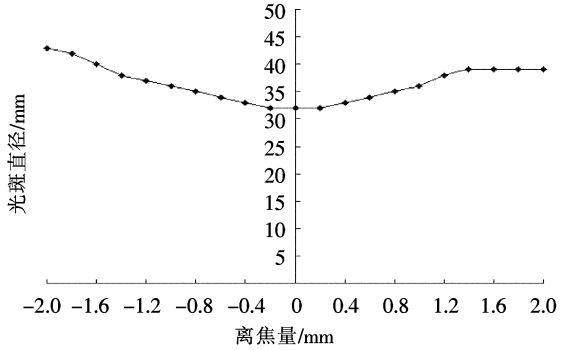

图6 光斑直径与离焦量关系

Fig. 6 Spot diameter relationships with off-focus

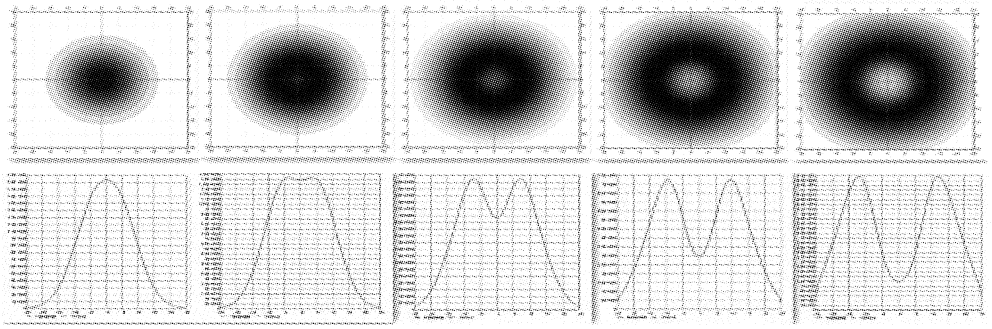

图7 负向离焦对光斑影响

Fig. 7 Negative off-focus impact on the spot

由图8径向离焦量与光斑关系图可以看出，在离焦量0～0.4 mm的范围内辐照度最大值没有变化，随着光斑离焦量的增大，在离焦量0.8～2.0 mm的范围内辐照度最大值呈平稳下降趋势，而辐照度平均值在整个离焦量范围内几乎没有变化。由图9(依次选取径向0.4,0.8,1.2,1.6,2.0 mm离焦量)可以观察出随着离焦量的增大光斑呈椭圆、变大趋势发展，水平方向光斑焦点整体向离焦的相反方向平移5 mm。

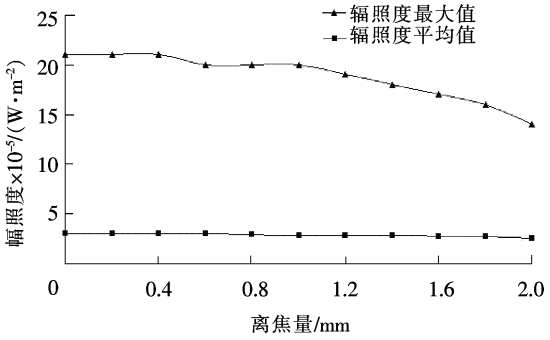

图8 辐照度与离焦量的关系

Fig. 8 Irradiance relationships with off-focus

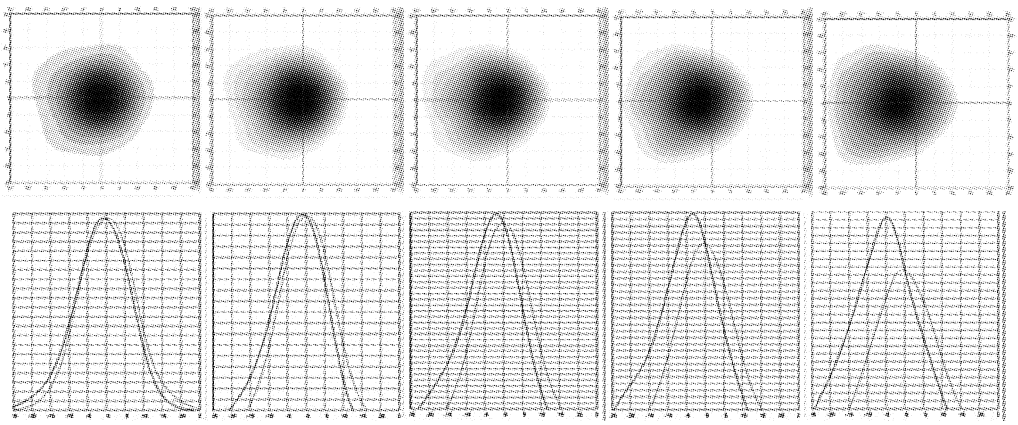

图9 径向离焦量对光斑影响

Fig. 9 Radial off-focus impact on the spot

3 结　论

本文依据聚焦型太阳模拟器光学系统的组成及其工作原理，在光学模拟软件 TracePro 中进行了光源离焦对光斑参数的影响模拟，并对模拟结果进行了分析。分析结果表明，光源轴向离焦时，光源离焦量对光斑幅照度平均值几乎没有影响，但是光斑幅照度最大值随着离焦量的增大而快速减小，特别是在负向离焦时，会形成环状高幅照度光斑；另外，在轴向离焦量增加的过程中，光斑直径会平缓增加。光源在径向离焦时，随着离焦量的增加，光斑幅照度平均值几乎没有变化，光斑幅照度最大值会随着离焦量的增加而减少，而在整个过程中，光斑呈椭圆、变大的趋势发展。综合以上分析结论可知，光源的准确安装是确保光学系统性能的重要因素，文中的一些模拟数据及分析可为光学系统调焦机构的设计提供理论上的参考。

参考文献/References：

[1] 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]. 光学技术，2012，32(10)：1022002-1-1022002-6.
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)：1022002-1-1022002-6.

[2] PETRASCH J，CORAY P S，MEIER A，et al. A novel 50 kW 11000 suns high-flux solar simulator based on an array of xenon arc lamps [J]. Journal of Solar Engineering，2007，129(4)：405-411.

[3] 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 Guochao，WANG Li，LIU Hongbo，et al. Optical design of solar simulator used for transient calorimeter calibration system[J]. Chinese Optics，2012，5(6)：630-638.

[4] 王志明，龚振邦，魏光谱，等. 用于太阳电池测试的太阳模拟技术[J]. 光学精密工程，2009，17(7)：1542-1547.
WANG Zhiming，GONG Zhenbang，WEI Guangpu，et al. Solar simulation technique for solar cell measurement[J]. Optics and Precision Engineering，2009，17(7)：1542-1547.

[5] 苏拾，张国玉，付芸，等. 太阳模拟器的新发展[J]. 激光与光电子学进展，2012(7)：070003-1-070003-8.
SU Shi，ZHANG Guoyu，FU Yun，et al. New development of solar simulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2012(7)：070003-1-070003-8.

[6] 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 Hongbo，GAO Yan，WANG Li，et al. Design of high-flux solar simulator[J]. Chinese Journal of Optics，2011，4(6)：594-599.

[7] 胡云岩，张瑞英，王军. 中国太阳能光伏发电的发展现状及前景[J]. 河北科技大学学报，2014，35(1)：69-72.
HU Yunyan，ZHANG Ruiying，WANG Jun. Development status and prospect of solar photovoltaic power generation in China[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2014，35(1)：69-72.

[8] 崔海亭，孙坤坤，李宁. 太阳能热发电用高温相变蓄热器的数值模拟[J]. 河北科技大学学报，2015，36(2)：219-224.
CUI Haiting，SUN Kunkun，LI Ning. Numerical simulation of high-temperature phase transition thermal energy storage container for solar thermal power generation applications[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2015，36(2)：219-224.

[9] 吕涛，张景旭，付东辉，等. 可提高太阳模拟器均匀性的变形椭球面聚光镜[J]. 光学技术，2013，33(12)：1223001-1-1223001-5.
LYU Tao，ZHANG Jingxu，FU Donghui，et al. A deformed ellipsoid condenser beneficial to the uniformity of the solar simulator[J]. Acta Optica Sinica，2013，33(12)：1223001-1-1223001-5.

[10] 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.
XIANG Yanhong，ZHANG Rong，HUANG Bencheng. Irradiation uniformity simulation of KFTA solar simulator[J]. Spacecraft Environment Engineering，2006，23(5)：288-292.

[11] 高玲，张国玉，苏拾，等. 基于全光谱输出太阳模拟器氙灯光源的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版)，2012，35(2)：82-84.
GAO Ling，ZHANG Guoyu，SU Shi，et al. Study on xe-lamp sources of full spectrum solar simulators[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)，2012，35(2)：82-84.

[12] 杜景龙，唐大伟，李铁. 5 kW 聚光型太阳模拟器加热特性的实验研究[J]. 太阳能学报，2012，33(4)：625-629.
DU Jinglong，TANG Dawei，LI Tie. Experiment study of the heating characteristics of 5 kW focused solar simulator[J]. Acta Energiae Solaris Sinica，2012，33(4)：625-629.

[13] 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，2013，6(4)：570-576.
GAO Yan，LIU Hongbo，WANG Li，et al. Design and development of a class AAA solar simulator[J]. Chinese Optics，2013，6(4)：570-576.

[14] 高雁，刘洪波，王丽，等. 大面积准直型太阳模拟器的设计与研制[J]. 中国光学，2014，7(4)：657-663.
GAO Yan，LIU Hongbo，WANG Li，et al. Design and manufacture of a large-area collimation solar simulator[J]. Chinese Optics，2014，7(4)：657-663.

[15] 刘石，张国玉，孙高飞，等. 具有一个太阳常量的高准直太阳模拟器光学系统设计[J]. 光子学报，2014，43(11)：1122005-1-1122005-6.
LIU Shi，ZHANG Guoyu，SUN Gaofei，et al. Design of optical system for the high-collimatiing solar simulator with one solar constant

[J]. Acta Photonica Sinica, 2014,43(11):1122005-1-1122005-6.

[16] 吕涛,张景旭,付东辉,等.太阳模拟器中椭球面聚光镜参数的确定[J].应用光学,2014,35(1):43-47.
LYU Tao,ZHANG Jingxu,FU Donghui, et al. Determination of ellipsoid condenser parameters in solar simulator[J]. Journal of Applied Optics,2014,35(1):43-47.

[17] 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 Yan, LIU Hongbo, WANG Li. Solar simulation technology[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics,2010,3(2):104-111.

[18] 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.
LIU Shi,ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Design of solar simulator in the meteorological radiation calibration system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(5):1345-1349.

[19] 向艳红,张容,于江. 氙灯水平点燃太阳模拟器灯单元设计[J].航天器环境工程,2009,26(1):60-62.
XIANG Yanhong, ZHANG Rong, YU Jiang. Design of lamp module of solar simulator with xenon lamp ignited horizon-tally[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009,26(1):60-62.

[20] 李子衿. 高辐照度太阳能模拟器的设计与实验研究[D].北京:华北电力大学,2014.
LI Zijin. Design and Experiment Research on High Flux Solar Simulator[D]. Beijing:North China Electric Power University,2014.

[21] LUQINSLAND F,STEINMETZ J, ZAHLER C,et al. An innovative solar simulator for research and development of solar thermal collectors [C]// 29th ISES Biennial Solar World Congress. NY: Fraunhofer ISE,2009:831-837.

[22] 张嘉钰,李金超,牛虎利. 光源位置偏差对光斑的影响分析[J].光学技术,2015,41(2):111-114.
ZHANG Jiayu,LI Jinchao,NIU Huli. Analysis of the influence on the light source position deviation to the spot[J]. Optical Technique, 2015,41(2):111-114.

《河北科技大学学报》《河北工业科技》影响因子再创新高

据中国知网发布的中国学术期刊影响因子年报,《河北科技大学学报》《河北工业科技》的复合影响因子和排名再创新高。《河北科技大学学报》的复合影响因子为 0.899,在 422 种综合性科学技术类期刊中位列第 27 名,比 2014 年上升 11 位;《河北工业科技》的复合影响因子为 0.827,在 422 种综合性科学技术类期刊中位列第 43 名,比 2014 年上升 22 位。

(河北科技大学学报编辑部)