

光学积分器对太阳模拟器辐照均匀性的影响

高 越¹ 张国玉^{1,2} 郑 茹¹ 高 迪¹ 苏 拾¹

(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 光学积分器是太阳模拟器实现均匀辐照的关键光学器件,介绍了光学积分器的组成及其工作原理,阐述了方位偏移误差和倾斜偏移误差对辐照均匀性的影响。根据光学积分器的工作原理,利用软件 Lighttools 将两种光轴一致性误差对辐照均匀性造成的影响进行了仿真分析。结合实验结果表明,倾斜偏移误差相对方位偏移误差对系统辐照均匀性的影响更为严重。分析光轴一致性误差,可为光学积分器微调机构的设计和实际装调太阳模拟器提供理论依据。

关键词 光学器件;太阳模拟器;光学积分器;辐照均匀性;光轴一致性

中图分类号 V524.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0623003

Solar Simulator Irradiation Uniformity Based on Optical Integrator

Gao Yue¹ Zhang Guoyu^{1,2} Zheng Ru¹ Gao Di¹ Sun Shi¹

(¹ Institute of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China
² Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement and Control Instruments,
Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract Optical integrator is a key optical device of the solar simulator for uniform illumination. The composition and working principle of the optical integrator are introduced, and effect of the azimuth offset error and the tilt offset error of on the irradiation uniformity are elaborated. According to the working principle of the optical integrator, effect of two axis-consistency errors on the irradiation uniformity are analysed by using the LightTools. Combining with experimental results, effect of tilt offset error relative azimuth error on the irradiation uniformity of system is more serious. Analysis of axis consistency error can provide the necessary reference for tuning mechanism of the optical integrator and the practical alignment .

Key words optical devices; solar simulator; optical integrator; irradiation uniformity; optical-axis consistency

OCIS codes 230.2090; 120.4630; 230.1360

1 引 言

太阳模拟器作为一种在室内利用人工光源模拟太阳光辐照特性的实验定标设备^[1],已在空间技术、遥感技术、气象监测和太阳能产业等诸多领域得到了广泛应用^[2,3]。近年来,随着科学技术的发展,太阳模拟器的技术指标也愈来愈高,辐照均匀性是衡

量太阳模拟器的主要技术指标之一,如何提高辐照均匀性已成为重点研究方向。在优化光学系统的基础上,对太阳模拟器的装调也提出了更为严格的要求。

太阳模拟器主要由氙灯光源、椭球聚光镜、光学积分器和准直镜等组成。其中椭球聚光镜和准直镜

收稿日期: 2011-11-23; 收到修改稿日期: 2012-01-11

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

作者简介: 高 越(1986—),男,硕士研究生,主要从事航天器地面标定与检测等方面的研究。

E-mail: yuedoing@163.com

导师简介: 张国玉(1962—),男,博士,教授,主要从事空间科学与技术、光电仪器与检测技术等方面的研究。

E-mail: zh_guoyu@yahoo.com.cn (通信联系人)

对太阳模拟器辐照均匀性存在影响,但影响较小。光学积分器是确保太阳模拟器辐照均匀性的关键^[4],其微小的光轴一致性误差都会对辐照均匀性造成严重影响,但在实际机械加工及后期装调中很难保证光学积分器处于绝对理论位置。这种误差无法通过理论公式进行计算,本文通过软件仿真和实际实验,分析光学积分器方位偏移和倾斜偏移对辐照均匀性的影响,进而得出不同光轴一致性误差对辐照均匀性影响的权重^[5]。

2 光学积分器的组成及工作原理

光学积分器的主要作用有两个,一是保证被照面的辐照均匀性,二是保证太阳模拟器较高的光能利用率^[6,7]。光学积分器由场镜组和投影镜组构成,如图 1 所示。这两组透镜阵列分别由通光口径相同的若干小元素透镜按中心对称的方式胶合而成,其中场镜组的各小元素透镜与投影镜组的对应小元素透镜同轴,形成一个并列多光通道系统^[8]。

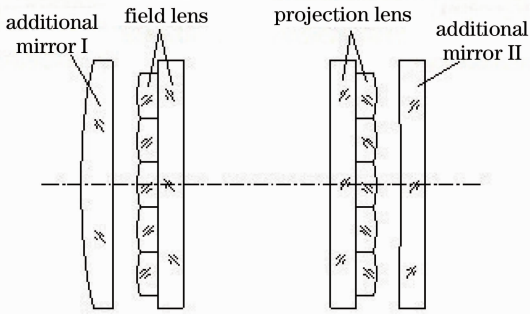


图 1 光学积分器结构图

Fig. 1 Structure of optical integrator

在太阳模拟器中,氙灯和椭球镜组成的聚光系统将椭球镜第一焦点处光源发出的光束会聚到椭球镜第二焦点,形成一个对称的辐照分布。这个辐照分布经光学积分器场镜组的各小元素透镜分割,每个小元素透镜将光源像成像到投影镜组对应的小元素透镜上,因为两组透镜对应的小元素透镜共轭,投影组的各小元素透镜分别将场镜组对应的小元素透镜成像至被照面且相互重叠,如图 2 所示,从而达到均匀辐照的目的^[9~11]。

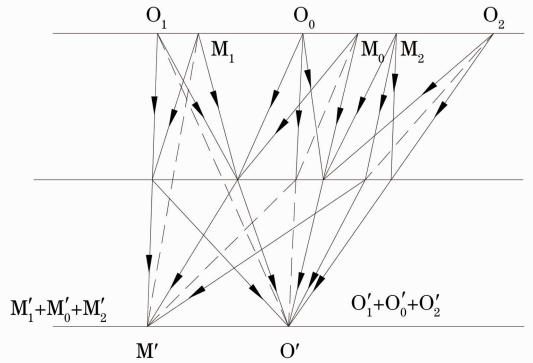


图 2 积分器成像关系图

Fig. 2 Relation imaging of optical integrator

3 光轴一致性误差对辐照均匀性的影响

光学积分器在安装调试过程中,由于存在光学机械加工误差和装调误差,会使积分器的光轴相对系统光轴发生偏移,并最终影响太阳模拟器的辐照均匀性。这种同轴一致性误差分为方位偏移误差和倾斜偏移误差,结合实际有 3 种存在形式,如图 3 所示。其中 ΔR 为方位偏移误差值, θ 为倾斜偏移误差角。

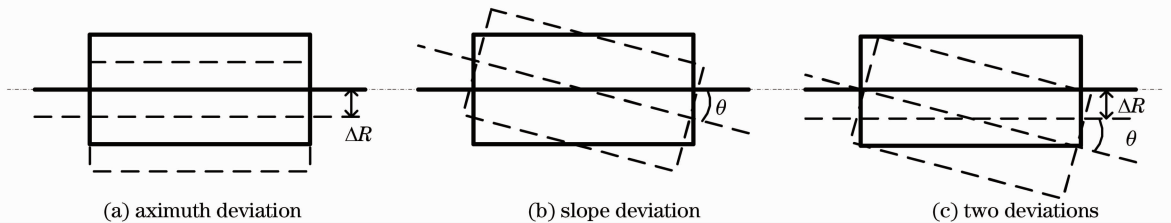


图 3 光学积分器同轴一致性误差

Fig. 3 Coaxial consistency error of optical integrator

本文重点研究光轴一致性误差对辐照均匀性的影响,在此列出所分析太阳模拟器辐照均匀性的相关指标:有效范围口径 $\phi 60$ mm 范围内辐照不均匀度为 $\pm 1\%$,辐照面最大辐照度为 1 太阳常数,即 1353 W/m^2 。在此利用 Lighttools 软件对理想状态下的太阳模拟器进行了模拟,其仿真效果图如图 4 所示。

在 Lighttools 仿真模拟时,被照面被分为若干

方格来接收数据,方格越小对辐照度分布情况的描述越好,模拟光线越多其仿真结果越准确。由于实际使用的探测器口径为 10 mm,设接收面口径为 100 mm,所以将接收面划分为 10×10 的网格,追迹光线 2000 万条^[12]。为直观的表达辐照均匀性情况,图 5 采用了二维和三维图像显示模拟结果。

由此可知, $\phi 60$ mm 范围内,最大辐照度为

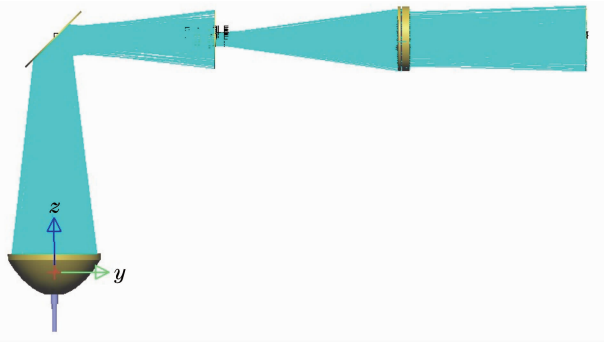


图 4 太阳模拟器仿真效果图

Fig. 4 Simulation of solar simulator

1400 W/m², 最小辐照度为 1380 W/m², 根据辐照不均匀度公式

$$\sigma = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%, \quad (1)$$

计算得到辐照不均匀度为 ±0.71%。

3.1 方位偏移误差对辐照均匀性的影响

理论上, 太阳模拟器聚光系统在光学积分器前形成中心高两侧低的辐照分布曲线, 由于光学积分器左右通道在辐照面形成的分布曲线曲率相反, 光束经过光学积分器后, 进行了相互补偿, 从而提高了被照面辐照均匀性, 如图 6 所示。可见光学积分器是否中心对称直接影响辐照均匀性。

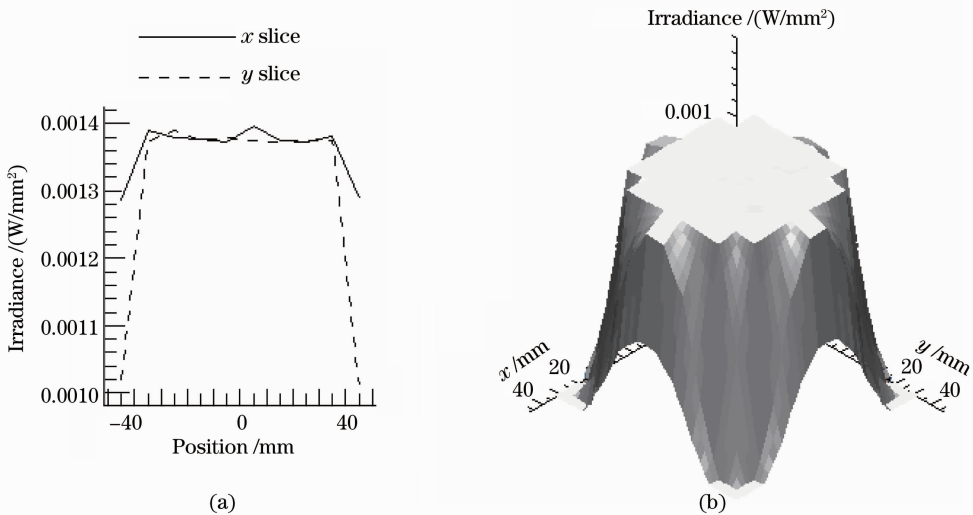


图 5 太阳模拟器辐照度分布显示图

Fig. 5 Irradiance distribution of solar simulator

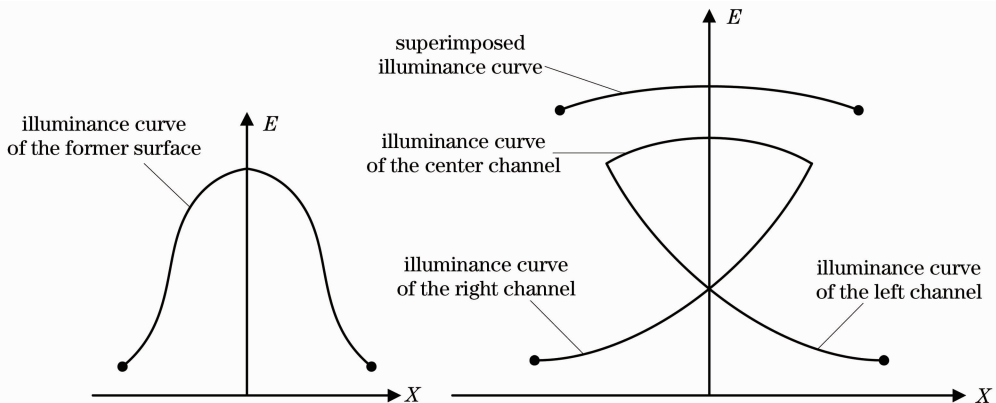


图 6 光学积分器照度分布曲线

Fig. 6 Illumination curves of optical integrator

本文所分析太阳模拟器根据太阳模拟器国家 A 级标准进行设计, 光学积分器与箱体安装孔的间隙配合公差等级为 H8/f7, 其最大间隙配合公差为 $X_{\max} = 0.054 - (-0.071) = 0.125$ mm, 最小间隙配

合公差为 $X_{\min} = 0 - (-0.036) = 0.036$ mm。根据设计公差可能造成的偏移量取最大方位偏移误差值 $\Delta R = 0.125$ mm 进行模拟仿真。由于光轴一致性误差对辐照均匀性造成的影响较其他因素, 相对较小,

模拟结果与理想状态结果相对比,三维图像表现并不明显,所以单独采用二维图像表示模拟结果,如图7所示。

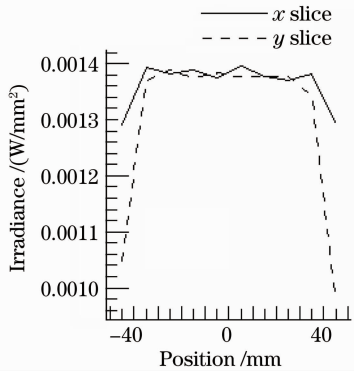


图7 方位偏移辐照度分布二维显示图

Fig.7 Two-dimensional display of irradiance distribution of azimuth deviation

由此可知,φ60 mm 范围内最大辐照度为 1400 W/m²,最小辐照度为 1370 W/m²,根据(1)式计算得到辐照不均匀度为±1.08%。

3.2 倾斜偏移误差对辐照均匀性的影响

在太阳模拟器光学系统中,光学积分器的倾斜偏移误差,会造成其光轴相对系统光轴会产生夹角,因与准直镜距离较远,光学积分器处较小的角度偏移,在准直镜处会产生较大的位置偏移,导致透过光学积分器若干小元素透镜的光束无法通过准直镜。在对辐照均匀性有较高要求的系统中,这种微量误差,将会导致辐照均匀性无法满足技术要求。

由太阳模拟器机械结构设计,以光学积分器安装孔端面为基准,光学积分器镜筒加工公差给出其垂直度为 0.05,则其倾斜偏移角度由下式给出:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta s}{L}\right) = \arctan\left(\frac{0.05}{30}\right) \approx 344'' \quad (2)$$

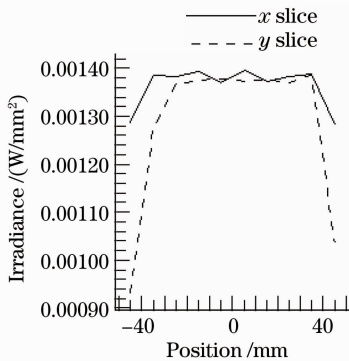


图8 倾斜偏移辐照度二维显示图

Fig.8 Two-dimensional display of irradiance distribution of slope deviation

式中 θ 为倾斜偏移误差角, Δs 为光学积分器镜筒加工垂直度公差, L 为光学积分器安装孔与光学积分器接触面的长度值。利用 Lighttools 对光学积分器倾斜偏移角 $\theta=344''$ 进行模拟仿真,结果如图8所示。

由此可知,φ60 mm 范围内最大辐照度为 1390 W/m²,最小辐照度为 1350 W/m²,根据(1)式计算得到辐照不均匀度为±1.46%。

3.3 两种误差同时存在时对辐照均匀性的影响

太阳模拟器在实际安装调试过程中,方位偏移误差和倾斜偏移误差必然同时存在,有必要对两种误差同时存在的情况进行仿真分析。根据上述内容,模拟最大方位偏移误差值 $\Delta R=0.125$ mm 倾斜偏移角 $\theta=344''$ 时,太阳模拟器的辐照分布情况,结果如图9所示。

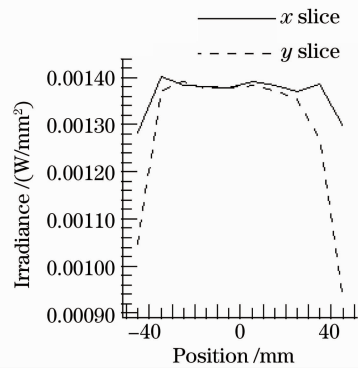


图9 两种误差同时存在辐照度二维显示图

Fig.9 Two-dimensional display of irradiance distribution of the two deviation errors

由此可知,φ60 mm 范围内最大辐照度为 1400 W/m²,最小辐照度为 1350 W/m²,由(1)式计算得到辐照不均匀度为±1.82%。根据对光学积分器两种光轴一致性误差的模拟结果对比,方位偏移误差使辐照不均匀度扩大了±0.37%,倾斜偏移误差使辐照不均匀度扩大了±0.75%,两种误差同时存在使辐照不均匀度扩大了±1.11%。

4 光轴一致性误差的补偿

太阳模拟器的装调遵循边调边测的原则,达到要求的技术指标后,光学积分器的位置一般固定不变。因此,需要在装调过程中对光学积分器两种光轴一致性误差进行补偿,以尽可能减小其对辐照均匀性的影响。

太阳模拟器在机械结构设计时,壳体上光学积分器的固定端面进行了机械精加工,以此为基准面,并且设计与光学积分器外形尺寸一致的半导体激

光器,装调时将其置于光学积分器安装孔,通过正反两次安装配合光学平面镜应用自准直法,保证太阳模拟器光学系统中光学积分器和其他重要组成部件最大限度的处于同一基准轴,如图 10 所示。此时,方位偏移误差也得到了最大限度的补偿。

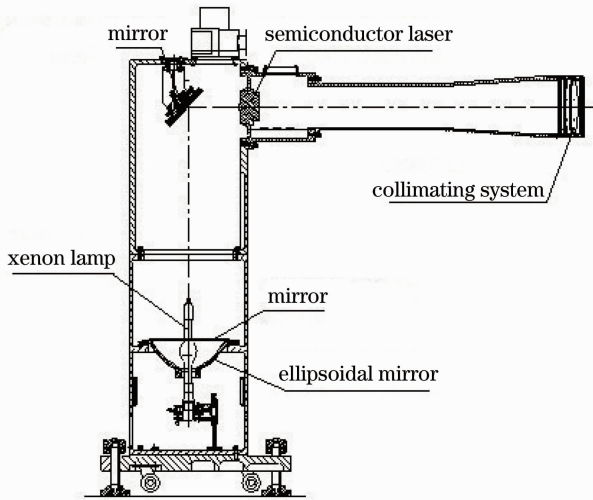


图 10 光学积分器方位偏移误差补偿

Fig. 10 Compensation of azimuth deviation error of optical integrator

光学积分器的机械结构中设计了三紧三拉式调整机构,如图 11 所示。通过此调整机构可对光学积分器倾斜偏移误差角进行微调,从而实现倾斜偏移误差的补偿。

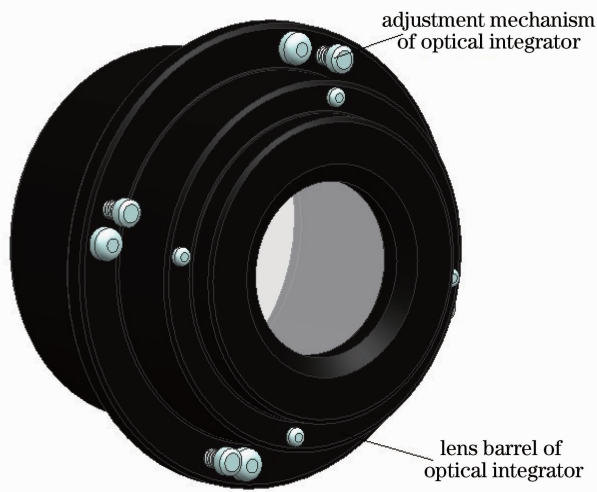


图 11 光学积分器示意图

Fig. 11 Sketch graph of optical integrator

5 实验与分析

为验证上述分析结果,针对光学积分器进行了实验,如图 12 所示。测试数据时,在最佳辐照面处

以光斑中心为圆心画圆,直径为 60 mm,另画 4 条直线将圆 8 等分,取直线与圆的 8 个交点和中心点为测试点利用辐照计进行测量。

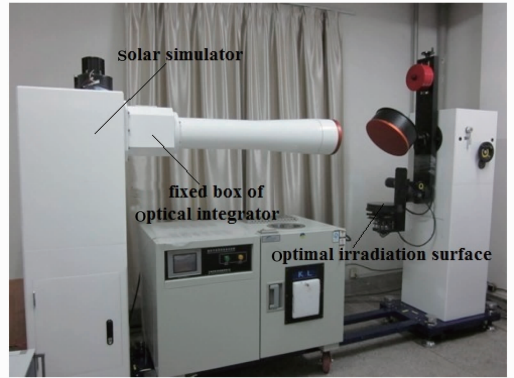


图 12 太阳模拟器实验装置图

Fig. 12 Experimental device of solar simulator

具体实验步骤如下:

1) 调节太阳模拟器达到技术指标的要求,以确定除光学积分器整体外,椭球聚光镜、氙灯光源、转向反射镜、准直镜和光学积分器两组小元素透镜处于最佳位置。将光学积分器及其固定箱体重新安装,不进行任何装调。待太阳模拟器工作稳定后进行第一组实验数据测试,此时视为两种同轴一致性误差同时存在时的辐照不均匀度。

2) 安装半导体激光器,利用上面所述方法严格调节太阳模拟器光轴,最大限度保证光学积分器与系统光轴的光轴一致性,以补偿方位偏移误差。调节完成后,微调氙灯光源达到最佳实验结果,并测试第二组实验数据。第一组和第二组数据之差视为方位偏移误差使辐照不均匀度的扩大值。

3) 调节光学积分器调整机构,补偿倾斜偏移误差,根据边调边测的原则,直至达到技术指标的要求,并测试第三组实验数据。第二组和第三组数据之差视为倾斜偏移误差使辐照不均匀度的扩大值。第一组和第三组数据之差即为两种误差同时存在使辐照不均匀度的扩大值。

对比 3 组实验数据,如表 1 所示。

由此可知,方位偏移误差使辐照不均匀度扩大了 $\pm 0.35\%$,倾斜偏移误差使辐照不均匀度扩大了 $\pm 0.75\%$,两种误差同时存在使辐照不均匀度扩大了 $\pm 1.1\%$ 。实验结果表明,光学积分器光轴一致性误差三种存在形式对辐照均匀性的实际影响,与模拟仿真分析结果基本一致。

表 1 太阳模拟器 $\phi 60$ mm 范围内辐照度均匀性实验数据(单位: W/m^2)Table 1 Irradiation uniformity test data of 60 mm range of solar simulator(Unit: W/m^2)

	Center point	First point	Second point	Third point	Fourth point	Fifth point	Sixth point	Seventh point	Eighth point	Irradiation non uniformity /%
First group	619	602	606	607	595	603	604	598	596	1.98
Second group	623	618	614	603	606	612	613	611	614	1.63
Third group	629	624	623	625	624	622	619	618	622	0.88

6 结 论

将光学积分器视作一个整体,重点分析了由设计公差导致的光轴一致性误差对辐照均匀性影响。通过 LightTools 模拟仿真,结合实验结果得出倾斜偏移误差较方位偏移误差对辐照均匀性的影响更大。同时在装调过程中,由非设计公差导致的倾斜偏移相对方位偏移更容易发生,并且不易调节。由此可见,如何减小或避免倾斜偏移尤为重要。

在传统太阳模拟器装调方法中,光学积分器投影镜组沿光轴离焦是调整辐照均匀性的重要手段。在实际装调时发现,光学积分器投影镜组的微量光轴一致性误差对辐照均匀性造成的影响同样严重。目前对光学积分器整体及其投影镜组的微调,多数采用三紧三拉结构,这种调整机构在微调时很难把握。随着太阳模拟器技术指标的越来越高,光学系统的优化越来越完善,更为科学、合理的光学积分器调整机构,值得深入研究。

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
- Chen Wenzhi, Jiang Lulin, Jiang Li *et al.*. Experimental research of spectral design of solar simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0222002
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
- Zhang Jiaqi, Qi jin, Fang Wei *et al.*. Correction of observation angle in solar radiation monitor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0212003
张佳琦, 齐 瑾, 方 伟等. 太阳辐射监测仪观测角度变化的修

正[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0212003

- Zhang Guoyu, Lü Wenhua, He Xiaolei *et al.*. Analysis on irradiation uniformity of sun simulator [J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(1): 41~45
张国玉, 吕文华, 贺晓雷等. 太阳模拟器辐照均匀性分析[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(1): 41~45
- Duan Xueting. Research of Coaxial Optical System Computer Aided Optical Axis Consistency Adjustment [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006
段学霆. 共轴光学系统计算机辅助光轴一致性装调研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006
- Jia Wenwu, Wang Yuefeng, Huang Feng *et al.*. Application of fly's eye lens in beam shaping laser diode array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0202008
贾文武, 汪岳峰, 黄 峰等. 复眼透镜在激光二极管阵列光束整形中的应用[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0202008
- Zhou Ping, Lu Wei, Lin Yuxiang *et al.*. Fly eye lens array used in liquid crystal projection display with high light efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 587~591
周 平, 陆 巍, 林宇翔等. 复眼透镜提高液晶投影照明系统的能量利用率[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 587~591
- An Guifang, Zhang Guoyu, Su Shi *et al.*. Analysis on improving the irradiation uniformity of the sun simulator by optical integrator [J]. *J. Changchun University of Science and Technology*, 2010, **33**(1): 1~3
安桂芳, 张国玉, 苏 拾等. 利用光学积分器提高太阳模拟器辐照均匀性的分析[J]. *长春理工大学学报*, 2010, **33**(1): 1~3
- M. Bennett, R. Pedlesny. Tow source simulation for improved solar simulation [C]. Proc. of the 21th IEEE PV Specialists Conf, 1990: 1422~1438
- Xu Liang. The Optical Design of the Moon Simulator and the Analysis for Irradiance and Uniformity [D]. Chang chun: Changchun University of Science and Technology, 2009
徐 亮. 月亮模拟器光学系统设计与辐照度均匀性分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2009
- EDD Y. Design and construction of the JPL SS15B solar simulate [C]. Third Space Simulation Conference, 1968
- Xiang Yanhong, Zhang Rong, Huang Bencheng. Irradiation uniformity simulation of KFTA solar simulator [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, **23**(5): 288~292
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

栏目编辑: 韩 峰