

太阳模拟器的拉赫不变量传递

单秋莎¹, 张国玉^{1*}, 刘石¹, 苏拾¹, 吕文华², 贺晓雷²

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要:介绍了太阳模拟器的组成及工作原理。在非成像光学的光学扩展量基础上,对照明系统和投影成像系统进行了光学匹配,并从拉赫不变量的角度分析了能量在整个系统中的传递情况,得出椭球聚光镜、光学积分器和准直物镜这三者的相对孔径相互之间的最佳匹配关系,即三者的相互之间的相对孔径值均为1/4时,满足光瞳衔接原理。计算得到了从物面到像面的拉赫不变量为0.45,验证了整个光学系统从物面到像面的拉赫不变量守恒,有效地利用了光学系统的光能。

关键词:太阳模拟器;拉赫不变量;能量传递;非成像光学;照明系统;投影成像系统

中图分类号:TM923.323; V524.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20120506.0639

Lagrange invariant energy transfer of solar simulator

SHAN Qiu-sha¹, ZHANG Guo-yu^{1*}, LIU Shi¹, SU Shi¹, LÜ Wen-hua², HE Xiao-lei²

(1. School of Photo-electronic Engineering, Changchun University of
Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. The Meteorological Detection Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: zh_guoyu@yahoo.com.cn

Abstract: This paper introduces the composition and operational principle of solar simulators. Based on the extence concept of non-imaging optics, the whole system including an illumination system and a projection imaging system are matched, and the energy transfer in the whole system is analysed on the basis of Lagrange invariant. The best matching relationship of relative aperture 1/4 among the ellipsoid condenser, optical integrator and the collimated object lens are obtained and satisfies the pupil connected principle. This calculated value of Lagrange invariant is 0.45, which verifies that the Lagrange invariant is conserved from an object surface to an image surface. So the optical energy of the optical system is used effectively.

Key words: solar simulator; Lagrange invariant; energy transfer; non-imaging optics; illumination system; projection imaging system

收稿日期:2012-09-21;修订日期:2012-11-23

基金项目:国家公益性行业科技专项资金资助项目(No. GYHY200706003, No. GYHY201006043);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20118012)

1 引言

太阳模拟器是一种模拟太阳光辐照特性的试验与测试设备^[1],它可在地面上模拟出一种与真实的太阳光在辐照度、均匀性^[2]、光谱分布、准直稳定等光学特性相接近的光源。太阳模拟器在太阳能利用、卫星姿态部件的测试标定、遥感技术与材料测量等方面具有广泛而重要的应用。

太阳模拟器光学系统可分为照明系统(氙灯光源、椭球聚光镜和光学积分器)和投影成像系统(准直系统)。光能利用率是评价系统性能优劣的标准,如何提高光能利用率是照明系统的关键问题^[3]。本文在运用光瞳衔接原理的基础上,根据拉赫不变量对整个系统传递的能量信息量进行分析,并通过照明系统和投影成像系统的匹配,提高了光能利用率。

2 太阳模拟器光学系统的组成及工作原理

太阳模拟器采用同轴透射式准直光学系统,如图1所示,它由椭球聚光镜、光源(氙灯^[4])、光学积分器(由附加镜 I、场镜组、投影镜组和附加镜 II)、视场光阑、准直物镜组组成。椭球聚光镜

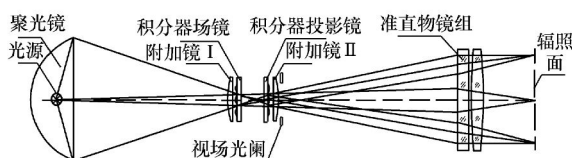


图1 太阳模拟器光学系统

Fig.1 Optical system of sun simulator

反射处于第一焦点处氙灯发出的光束,并汇聚到在第二焦点处即光学积分器场镜组,在有效通光孔径内形成一个照度分布。此照度分布经光学积分器透镜阵列中处于对称位置上的单元透镜的分割作用,最后经附加镜 II 和准直物镜的共同作用成像叠加在最佳辐照面处。逆着光路看去,准直物镜物方焦面上的视场光阑发出的光束像是成像在无穷远处^[5-6],从而模拟了太阳光照射。

3 能量传递分析

非成像光学理论中的一个重要概念^[7]是光学扩展量(étendue量),它是非成像光学的核心内容,根据同性非导体媒质中的时谐场并运用程函方程(eikonal)可导出:

$$U_e = \int du = \iiint n^2 dx dy dL dM, \quad (1)$$

式中: n 为折射率; x, y 为位置参数; L, M 为光线的方向余弦; (x, y, L, M) 为构成的四维相空间,其与哈密顿相空间相类似。由étendue量的定义可知:在理想光学系统,即不考虑系统反射、折射、散射等能量损失的情况下,光学系统的étendue量守恒。理想光学系统中光学扩展量保持不变,实际是系统能量守恒定律作用的一种。

光学扩展量守恒是一个普遍使用的定律,不管折射率的均匀性或者系统的对称性,它都适用。在旁轴近似旋转对称光学系统中,一对共轭面内的光学扩展量与拉赫不变量(Lagrange invariant)有关;在二维结构光学系统中,拉赫不变量是光学扩展量的一个特殊的表现形式。假设二维结构中 $x=0, M=0$,则由式(1)可以得到:

$$E = \int n dy dL = n y \sin \theta, \quad (2)$$

从而有:

$$n y \sin \theta = n' y' \sin \theta', \quad (3)$$

即:

$$J = n u y = n' u' y'. \quad (4)$$

拉赫不变量表明,同轴光学系统中,实际光学系统在近轴区成像时,在任意面的物像空间内,物体大小 y 、成像光束的孔径角 u 和物体所在介质的折射率 n 的乘积为一常数^[8]。

根据对太阳模拟器光学系统整体结构分析可知其有两对物像共轭面,本文在运用拉赫不变量的基础上,分别对其进行了能量传递分析。

3.1 第一对物像共轭面能量传递分析

椭球面聚光镜的出射端面通过光学积分器成像在准直物镜的物方焦面处,可知椭球镜的出射端面和准直物镜的物方焦平面是一对共轭面,即为第一对物像共轭面,如图2所示,取光学积分器中心通道进行分析,因此,在第一对共轭面内,拉

赫不变量表示为:

$$J_1 = n_1 u_1 y_1 = n'_1 u'_1 y'_1, \quad (5)$$

式中: u_1 为物方孔径角,即场镜组中心小透镜对聚光镜出瞳的半张角; u'_1 为像方孔径角,即场镜组中心小透镜对投影镜组对应通道的半张角; y_1 为椭球镜出瞳的半口径; y'_1 为投影镜组小透镜半直径;物方、像方均处在空气中, $n_1 = n'_1 = 1$ 。

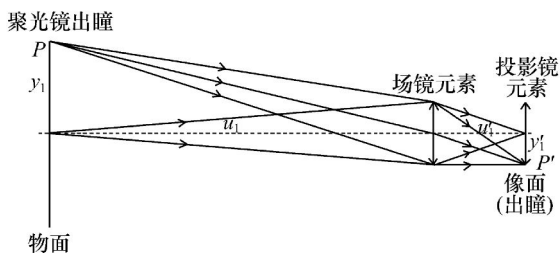


图2 第一对共轭面光路图

Fig.2 Ray diagram of the first conjugate surface

3.2 第二对物像共轭面能量传递分析

光学积分器场镜组位于椭球镜的第二焦点处,椭球镜将位于第一焦点处的氙灯发出的氙弧会聚到第二焦点,即氙弧经光学积分器和准直物镜成像在最佳辐照面处,可知氙弧和最佳辐照面是一对共轭面,即为第二对物像共轭面,如图3所示。同样对光学积分器中心通道进行分析,其拉赫不变量表示为:

$$J_2 = n_2 u_2 y_2 = n'_2 u'_2 y'_2, \quad (6)$$

式中: u_2 为物方孔径角,即投影镜组中心小透镜对场镜组对应通道的半张角; u'_2 为像方孔径角,即准直物镜对最佳辐照面的半张角; y_2 为场镜组小透镜半直径; y'_2 为最佳辐照面的半口径;物方、像方均处在空气中, $n_2 = n'_2 = 1$ 。

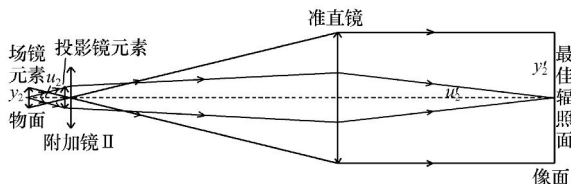


图3 第二对共轭面光路图

Fig.3 Ray diagram of the second conjugate surface

太阳模拟器模拟一种高能量、光谱分布相似程度高的太阳光,为充分利用光能,采用一种椭球面反射式聚光系统,并选用接近太阳光谱的短弧

氙灯作为光源。椭球聚光镜有两个焦点,由第一焦点发出的光经椭球反射后将无球差的会聚到第二焦点上^[9],这是椭球面反射镜的光学特性。氙灯发光区域位于其第一焦点处,光学积分器场镜组位于第二焦平面上。椭球聚光镜外形尺寸图如图4所示。

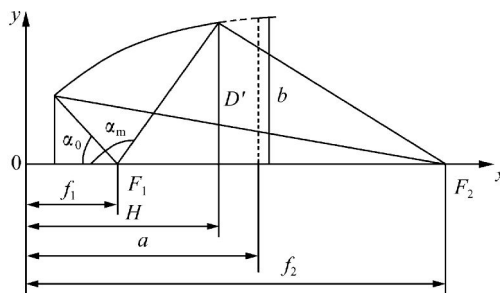


图4 椭球聚光镜外形尺寸图

Fig.4 Ellipsoid condenser optical parameter

椭球镜外形尺寸的计算公式为:

$$y^2 = 2R_0x - (1 - e^2)x^2, \quad (7)$$

式中:

$$\begin{cases} R_0 = \frac{2f_1 f_2}{f_1 + f_2} \\ e = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \\ f_2 = M_0 f_1 \\ a = (f_1 + f_2)/2 \\ b = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \\ H = a - (a/b) \cdot \sqrt{b^2 - (D'/2)^2} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: f_1 为椭球聚光镜的第一焦点; f_2 为椭球聚光镜的第二焦点; e 为椭球面偏心率; R_0 为椭球面近轴(顶点处)曲率半径; M_0 为椭球聚光镜近轴成像倍率; α_0 、 α_m 分别为椭球面物方孔径角; a 、 b 分别为椭圆的半长轴、半短轴; H 为椭球镜的深度; D' 为椭球镜出瞳直径,即椭球面的有效口径。

为充分利用光能,椭球面反射镜的包容角即 $\alpha_m - \alpha_0$ 取值越大越好,并且椭球镜的相对口径比光学积分器的相对口径要稍大些,即椭球镜的输出数值孔径稍大于光学积分器的数值口径。椭球镜的相对口径为:

$$A = D'/f', \quad (9)$$

式中: $f' = f_2 - H$ 。

这样,光源出射的光通量便能完全充满光学积分器场镜组通光孔径内。

为保证太阳模拟器辐照面的辐照均匀性^[10-11],通常采用对称式光学积分器。它由两组前后排列的透镜阵列组成,依次为场镜组和投影镜组,场镜组的前面和投影镜组的后面依次是附加镜 I 和附加镜 II,每组透镜中小透镜的排列方式、个数一致,小透镜的相对孔径和焦距都相等,前后组小透镜互在对方的焦点处,前组小透镜和对应的后组小透镜组成一个光学通道,其结构如图 5 所示。聚光镜的出瞳位于附加镜 I 的焦面上,起到会聚光线的作用,前后组小透镜互在对方的焦点处,相对应的前后组小透镜组成一个光学通道。前组透镜将接收到的光源像对称分割,在后组对应的透镜上形成与分割次数相同的二次光源像,并与对应的前组透镜对应成像,再通过附加镜 II 和准直物镜共同作用重叠成像于最佳辐照面处,即前组小透镜和最佳辐照面共轭。由于光源的整个宽光束经前组透镜阵列分割成多个对称分布的细光束,这样补偿了每个细光束范围内的微小不均匀性,根据物像共轭关系可知,每一个光学通道的光束经过附加镜 II 和准直物镜共同作用成像在最佳辐照面的同一位置处并进行叠加,即实现了均匀照明,经历了由微分到积分的一个过程,在最佳辐照面上可得到均匀的光强分布^[12]。

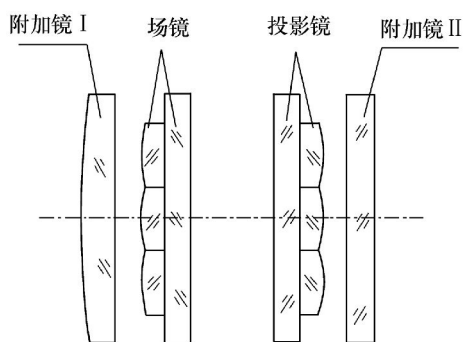


图 5 光学积分器结构图

Fig. 5 Construction diagram of optical integrator

由于场镜组和投影镜组的小透镜口径相同,即有 $y'_1 = y_2, u'_1 = u_2$, 所以 $J_1 = J_2$ 。因此,在不考虑反射、折射和吸收损失的前提下,氙灯出射的光能完全入射到光学积分器,并且从场镜组中每个

小透镜到投影镜组对应的小透镜的能量保持不变,即保证了照明系统的拉赫不变量前后一致性,并将能量传递到后继的投影系统,即准直系统。

光学积分器中每个光学通道都有各自的光轴,且均与光学系统的光轴平行。经椭球镜会聚的光线经过附加镜 I 近似平行地入射到场镜组各个小透镜,所以每个小透镜传递的能量是一样的,即有相等的拉赫不变量,每个小透镜的拉赫不变量公式^[5]为:

$$J = n'_1 u'_1 y'_1, \quad (10)$$

式中: $n'_1 = 1, u'_1 = D_0/2f'_0, y'_1 = D_0/2$ 。其中: D_0/f'_0 为小透镜的相对孔径, D_0 为小透镜的有效通光孔径, f'_0 为小透镜的有效焦距。

为满足光束准直角的要求,需要在光学积分器后即准直物镜的物方焦面处加视场光阑,视场光阑的大小可由公式得出:

$$d = 2f' \cdot \tan\theta_0, \quad (11)$$

式中: d 为视场光阑的直径, f' 为准直物镜的焦距, θ_0 为光束准直半角。

准直物镜的相对孔径限制着能量的传递,为了实现在理想状态下将光学积分器中的能量全部传递到准直系统,必须保证准直物镜的相对孔径和光学积分器中每个小透镜的相对孔径相一致,即为光瞳衔接原理。

4 举例分析

利用以上公式来体现拉赫不变量在小型准直式太阳模拟器整个光学系统中的传递情况。选取准直物镜的相对孔径 $D/f' = 1/4$, 透镜直径 $D = 80 \text{ mm}$, 可得焦距 $f' = 320 \text{ mm}$, 准直角 $\theta_0 = \pm 1.5^\circ$, 由式 (11) 可求得视场光阑的大小 $d = 16.759 \text{ mm}$, 选用双分离透镜, 它的像质较双胶合透镜好。根据光瞳衔接原理可知, 光学积分器场镜组(投影镜组)每个小透镜的相对孔径为 $1/4$, 选取积分器口径为 22 mm , 基板的直径为 28 mm , 附加镜 II 的直径为 28 mm , 其具体参数如表 1 所示。取积分器光学通道数为 7, 并得出小透镜内切圆直径为 7.2 mm , 即为有效通光孔径, 由式 (10) 可求得每个小透镜的拉赫不变量为 $J_0 = 0.45$ 。

表1 附加镜II和准直物镜的具体参数

Tab.1 Specific parameters of collimated object lens and additional mirror II

名称	平面	半径/mm	厚度/mm	玻璃	半口径/mm
附加镜II	1	-260	4	JGS3	14
	2	Infinity	298.582		14
准直物镜	3	451.503	9	ZF1	40
	4	125.476	3.5		40
	5	130.370	11.5	K9	40
	6	-182.629	500.013		40

用Zemax光学设计软件分别设计出准直物镜和附加镜II,可得出准直物镜的物方主平面 $l_H = 13.663$ mm,像方主平面 $l'_H = 7.569$ mm;还可得出附加镜II的物方主平面 $l_{HII} = 0$,像方主平面 $l'_{HII} = -2.743$ mm。

从光学积分器投影镜组每个通道的小透镜出射的光束平行地入射到附加镜II上,即每个通道光线的投射高度为小透镜的内切圆直径, $2h = 7.2$ mm,且有 $h = f'_{II} \cdot u_2$,其中: f'_{II} 为附加镜II的焦距, $f'_{II} = -567.111$ mm; u_2 为物方孔径角,经附加镜II后投射到准直物镜上,光线经过准直物镜将成像会聚到最佳辐照面的中心点O处,把附加镜II和组合准直物镜分别看做两个光组,根据物像共轭关系,附加镜II和准直物镜的成像关系如图6所示。

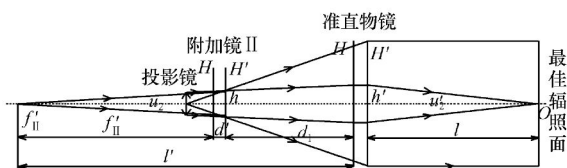


图6 附加镜II和准直物镜的成像关系图

Fig.6 Imaging diagram of additional mirror and collimated object lens

由图6可得出三角几何关系式:

$$\frac{h}{h'} = \frac{f'_{II} + d'}{l'} \quad (12)$$

式中: $h = 3.6$ mm; $f'_{II} = -567.111$ mm; $d' = 4 + l'_{HII} = 4 - 2.743 = 1.257$; $d_1 = -l'_{HII} + 298.582 + l_H = 314.988$ mm; $l' = f'_{II} + d' + d_1 = 883.356$ mm; 代入(12)可得 $h' = 5.596$ mm; $u'_2 = h'/l$, 式中: $l =$

500.013 mm,得 $u'_2 = 0.0112$ 。因此,拉赫不变量 $J = n'_2 u'_2 y'_2 = 1 \times 0.0112 \times 40 = 0.45$,当光学积分器中心通道小透镜经附加镜II和准直物镜成像在最佳辐照面处, J 即为准直物镜所传递的能量信息。

选取椭球镜的第一焦点 $f_1 = 20$ mm,放大率 $M_0 = 25$,根据式(7)~(9)可求得第二焦点即 $f_2 = 500$ mm,椭球镜顶点开口直径 $\Phi 12.4$ mm,椭球镜出瞳直径为114 mm,包容角为 96.59° ,椭球镜的深度 $H = 46.37$ mm,椭球镜的相对孔径 $A = 1/4$,等于光学积分器的相对孔径,实现了椭球镜和光学积分器的光瞳衔接,这样光源发出的光能量将完全充满光学积分器通光孔径。

由上述数据分析可知,光学积分器中心通道小透镜的拉赫不变量 $J_0 = 0.45$,等于准直物镜的拉赫不变量 $J = 0.45$,即照明系统的拉赫不变量等于投影成像系统的拉赫不变量,并且前后两个系统的相对孔径一致,即满足光瞳衔接原理,两者还满足成像关系^[10]。这样,照明系统提供的光能便能全部充满投影系统,并且在最佳辐照面上得到均匀的成像光斑。

5 结论

辐照度是太阳模拟器重要技术指标之一^[10],合理地完成整个系统各个光学元件之间的光学匹配,有利于充分地利用光源发出的能量。本文从非成像光学系统出发,基于二维情况下的光学扩展量,即拉赫不变量,分析了椭球镜和光学积分器以及准直系统相互之间相对孔径的匹配,满足了光瞳衔接原理^[13-15],完成了从照明系统到投影成

像系统能量信息的传递,进一步提高了能量利用率。此种方法还可应用于其他照明系统^[16],用来评价照明系统整体性能的优劣,具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 王俊,黄本诚,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 simulator technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [2] 袁亚飞,刘氏,杨亦强. 太阳模拟器辐照不均匀性测试系统的研制[J]. 仪器仪表学报,2006(增刊):238-240.
YUAN Y F, LIU M, YANG Y Q, *et al.*. The measurement system of solar simulator irradiance non-uniformity[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2006(s.):238-240. (in Chinese)
- [3] 李刚,周彦平. 卫星仿真测试用太阳模拟器和地球模拟器设计[J]. 红外技术,2001,29(5):283-287.
LI G, ZHOU Y P. Design of solar simulator and earth simulator for satellite attitude simulation[J]. *Infrared Technology*, 2001,29(5):283-287. (in Chinese)
- [4] 任建岳,苏克强,王兵,等. 真空应用太阳模拟灯及其灯阵的研制[J]. 光学精密工程,2010,18(8):1699-1706.
REN J Y, SU K Q, WANG B, *et al.*. Development of vacuum application solar simulation Xe flash-lamp array[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(8):1699-1706. (in Chinese)
- [5] 钟民. 一种太阳模拟器的光学系统设计及辐照特性研究[D]. 长春:长春理工大学,2010.
ZHONG M. Optical system design and irradiation characteristics of a solar simulator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [6] 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.
XU L. The optical design of the moon simulator and the analysis for irradiance and uniformity[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [7] 黄健. 非成像光学系统设计方法及其在LED道路照明工程中的应用[D]. 杭州:浙江大学,2008.
HUANG J. The design method and the application of the road illuminating engineering in LED of non-imaging optics system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [8] 张以谟. 应用光学[M]. 北京:电子工业出版社,2008. 8.
ZHANG Y M. *Applied Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 8. (in Chinese)
- [9] 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 H B, GAO Y, WANG L, *et al.*. Design of high-flux solar simulator[J]. *Chinese Optics*, 2011,4(6):594-599. (in Chinese)
- [10] 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(2):41-45.
ZHANG G Y, LV W H, HE X L, *et al.*. Analysis on irradiation Uniformity of sun simulator[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2009,2(2):41-45. (in Chinese)
- [11] 钟民. 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)
- [12] 钟民,张国玉,林子棋,等. 气象用太阳模拟器光学系统仿真[J]. 气象水文海洋仪器,2010(4):1-4.
ZHONG M, ZHANG G Y, LIN Z Q, *et al.*. Optical system simulator of weather solar simulator[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2010(4):1-4. (in Chinese)
- [13] EDD Y. Design and construction of the JPL SS15B solar simulator[C]. Third Space Simulation Conference, Seattle, Washington, Sep. 16-18, 1968.
- [14] LIEBMANN R. Solar simulator for a 3-m space environment chamber[J]. *Appl. Opt.*, 1968,7(2):315-323.
- [15] FRE Y. Study of a large solar simulator at ESTEC, PB 83-13127[R]. Alexandria, Virginia: USA Department of Commerce National Information Service, 1968.
- [16] 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):32-35.

WANG S P, LING J B, LIU L W, *et al.*. Simple lighting system applied to the solar simulation [J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2006, 33(9): 32-35. (in Chinese)

作者简介:单秋莎(1986—),女,山东菏泽人,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:shqsh.2007@163.com

张国玉(1962—),男,吉林松原人,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

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国最早创办的液晶学科专业期刊之一
- 中国液晶学科和显示技术领域综合性学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊,中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国物理学会液晶分会和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报和综合评述等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价40.00元。国内邮发代号:12-203;国外发行代号:4868BM。

地址:长春市东南湖大路3888号

《液晶与显示》编辑部

邮编:130033

E-mail:yjxs@ciomp.ac.cn

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

电话:(0431)6176059

网址:www.yjyxs.com