

摄远物镜实现太阳模拟器的小型化

吕涛 付东辉 陈小云 郭帮辉

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 太阳模拟器是非成像光学领域的重要应用。由于光学系统的特殊性,导致其光路很长,当采用双分离准直物镜时,准直系统的长度占了很大一部分。因此为实现太阳模拟器的小型化,提出将具有短后截距的摄远物镜替代通常采用的双分离准直物镜,从而缩短准直系统的长度,使光学系统的结构更加紧凑。同时设计了一种三片式的摄远物镜,并通过LightTools软件仿真分析的方法研究了这种三片式的摄远准直物镜对太阳模拟器技术指标的影响。仿真结果表明:应用这种摄远物镜可以在太阳模拟器技术指标变化不大的情况下,实现太阳模拟光学系统缩短,有利于太阳模拟器的小型化。

关键词 光学设计;非成像光学;太阳模拟器;小型化;摄远物镜;准直

中图分类号 TH741;V416.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.012201

Miniaturization of Solar Simulator by Using Telephoto Lens

Lü Tao Fu Donghui Chen Xiaoyun Guo Banghui

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Solar simulator is an important application in non-imaging optics, its optical path is long because of the special optical system, and the collimating system accounts for nearly half of the whole optical path when the dual separation collimating lens are used. In order to achieve the miniaturization of solar simulator, the telephoto lens is used, and the telephoto lens has a short back focal length. When the dual separation collimating lens is replaced by the telephoto lens, the optical path of the collimating system can be shorter and the whole solar simulator optical path can be more compact. The collimating system with three-piece telephoto lens is designed, and the impact on the solar simulator technical specifications is studied through LightTools software simulation analysis. The simulation results show that although the solar simulator technical specifications change little. The simulator optical path becomes shorter, therefore the solar simulator can be miniaturized by using the telephoto lens as collimating optical system.

Key words optical design; non-imaging optics; solar simulator; miniaturization; telephoto lens; collimation

OCIS codes 220.2945; 220.3620; 220.4298; 350.6050

1 引言

太阳模拟器是一种能够在室内环境下模拟不同大气质量条件下的太阳光辐照特性如辐照强度、辐照均匀性和辐照稳定度等的科学试验或定标仪器。太阳模拟器是伴随着空间科学技术的发展应运而生的,可用于卫星空间姿态控制太阳敏感器的模拟试验与定标、多光谱扫描仪的太阳光谱辐照响应的定标及航天器的热平衡试验^[1-4]。随着新技术和新产业的发展,太阳模拟器在太阳能电池的检测^[5-7]、材料的老化性能试验、植物的发育和培育^[8]以及人体的保健和康复^[9]等方面都具有重要的应用。

太阳模拟器主要由光源、椭球面聚光镜、光学积分器和准直物镜组成^[10-11],准直物镜可以将太阳模拟器输出的光束转换成平行光的形式,这些平行光的光束张角即为准直角^[12],而这种以平行光光束输出的太阳模拟器称为准直式太阳模拟器。

收稿日期: 2014-08-04; 收到修改稿日期: 2014-08-07; 网络出版日期: 2014-12-05

基金项目: 国家863计划(2013AA7031010B)

作者简介: 吕涛(1984—),男,博士,助理研究员,主要从事空间环境目标地面模拟光学设备和精密光学仪器方面的研究。E-mail: lvtao1984@gmail.com

准直式太阳模拟器按准直光学系统的结构可以分为离轴反射式结构和同轴透射式结构。离轴反射式一般用于较大辐照面的模拟器(辐照面直径大于 $\Phi 300\text{ mm}$),同轴透射式一般用于辐照面直径小于 $\Phi 300\text{ mm}$ 的模拟器^[13],本文研究的对象为同轴透射准直式太阳模拟器。轴透射式太阳模拟器的准直光学系统常采用倒置的双分离物镜,当采用双分离物镜时,其后截距与焦距近似相等,因此当准直角光阑位于双分离物镜的焦面上时,两者之间的空气间隔近似为准直物镜的焦距^[14],对于准直型太阳模拟器,尤其是对小准直角的太阳模拟器设计时,考虑到光学积分器的可加工性,一般要求准直角光阑的口径较大,从而导致准直镜的焦距大幅增加,使得太阳模拟器的尺寸也大幅增加,为缩小仪器尺寸,实现太阳模拟器的小型化,提出和设计采用了摄远型准直物镜。

2 摄远物镜的工作原理

一般物镜结构中,物镜的长度都大于其焦距,在一些要求物镜的焦距较长的高倍望远物镜中,为了减小物镜的结构尺寸和质量,总是希望能够减小物镜光学系统的长度,这种物镜一般由前置的正透镜组和后置的负透镜组组成,称为摄远型物镜,其结构如图1所示。

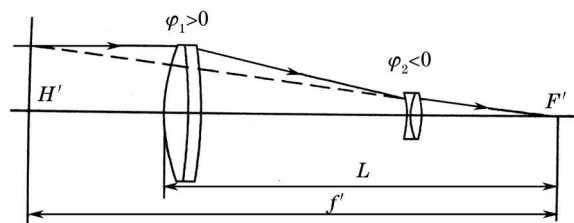


图1 摄远物镜的光学原理

Fig.1 Optical principle of telephoto lens

摄远物镜的优点^[15]如下:

- 1) 系统的长度小于物镜的焦距,一般可达焦距的 $2/3 \sim 3/4$ 。
- 2) 因为整个系统由两个薄透镜组构成,所以可以校正球差、彗差、场曲和像散4种单色像差,而对色差是不可能校正的。

摄远物镜的缺点是其相对口径一般都比较小。由于前组正透镜组的相对口径必须是整个光学系统相对口径的2倍以上,因此为了获得较高的成像质量,必须将前组复杂化,增大前组的相对口径可增加整个系统的相对口径。

对于太阳模拟光学系统,并不是以成像质量为主要评价标准的传统光学系统,而是着重考虑光源发光特性与光学元件之间的光学特性匹配,这点与投影显示光学系统是一致的。准直物镜作为空间光调制器件^[16],不仅要与系统的光学特性匹配,而且应当具有较好的成像质量,而前者更是设计时重点考虑的问题,否则会造成能量传递效率降低或系统利用率降低,具体到设计参数则是准直物镜的焦距和 F 数,而对像差的要求则是其次考虑的问题。

3 一种摄远型准直物镜的设计

在某太阳模拟光学系统中,设计采用焦距为 $f=650\text{ mm}$, $F=4$ 的准直物镜,设计采用的双分离准直物镜结构参数如表1所示,模型如图2所示,图3为其球差和轴向色差曲线。

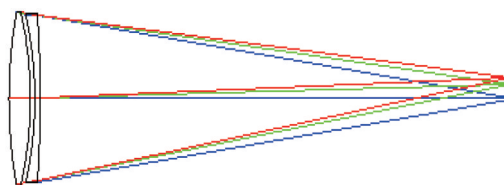


图2 双分离准直物镜的模型

Fig.2 Model of dual separated collimating lens

表1 双分离准直物镜结构参数

Table 1 Structure parameters of dual separated collimating lens

Surf: type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Semi-diameter /mm
OBJ	Standard	Infinity		Infinity
STO	Standard	366.636000	K9	85.316296
2	Standard	-302.53400		84.969517
3	Standard	-290.331000	ZF2	83.439468
4	Standard	-938.091000		83.061213
IMA	Standard	Infinity		20.500110

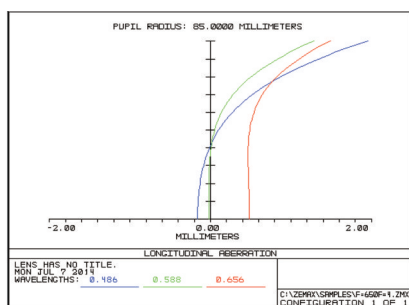


图3 双分离物镜的球差和轴线色差

Fig.3 Chromatic aberration and spherical aberration of dual separated collimating lens

双分离准直物镜实质为一个正透镜,要实现摄远物镜,必须在其后端加入一个负透镜,系统的评价指标除默认的评价指标外,仍需控制系统焦距、像方数值孔径和后截距这三个重要评价指标。图4为设计完成的一个焦距为 $f=650\text{ mm}$, $F=4$ 的摄远型准直物镜模型图,其后截距约为225 mm,表2为设计参数表,图5为摄远物镜的球差和轴线色差曲线。

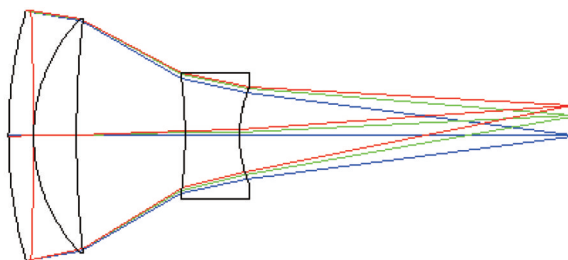


图4 摄远型物镜的模型

Fig.4 Model of telephoto lens

表2 摄远型物镜的结构参数

Table 2 Structure parameters of telephoto lens

Surf: type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Semi-diameter /mm
OBJ	Standard	Infinity		Infinity
STO	Standard	302.762645	ZK1	85.386226
2	Standard	-2361.736827		85.114575
3	Standard	116.366646	FK2	79.904261
4	Standard	740.205152		79.332883
5	Standard	-322.437095	Zf6	43.451421
6	Standard	85.202528	M	33.506160
IMA	Standard	Infinity		21.262423

从表1和表2可见,双分离物镜的后截距为618 mm,摄远型物镜的后截距仅为225 mm,系统长度缩短了278 mm,但是比较图3和图5可见,设计完成的摄远型物镜较双分离物镜具有较大的球差和轴向色差,文献[14]指出准直物镜的球差和色差会影响太阳模拟器输出光束的平行性,当对光束的平行性要求不高时,设

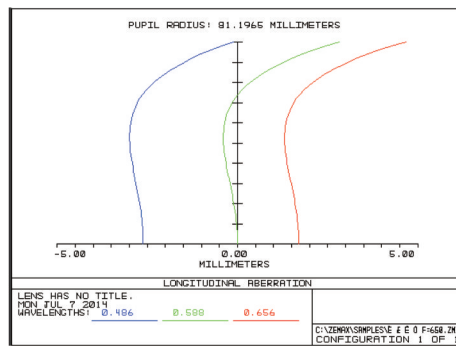


图5 望远物镜的球差和轴向色差

Fig.5 Chromatic aberration and spherical aberration of telephoto lens

计是可行的,而当对光束的平行性有较高要求时,设计仍有改善的空间。

4 望远准直物镜对太阳模拟器技术指标的影响

由上述设计结果可见,采用望远物镜可以缩短太阳模拟光学系统的长度,使系统结构更加紧凑,但是采用望远物镜后,太阳模拟器的技术指标是否会发生变化,为此将第3节中的太阳模拟光学系统的双分离物镜变更为设计完成的三片式望远物镜,图6为采用双分离物镜的光学系统模型,图7为采用望远物镜的光学系统模型,两者除准直系统不同外,其余均相同。

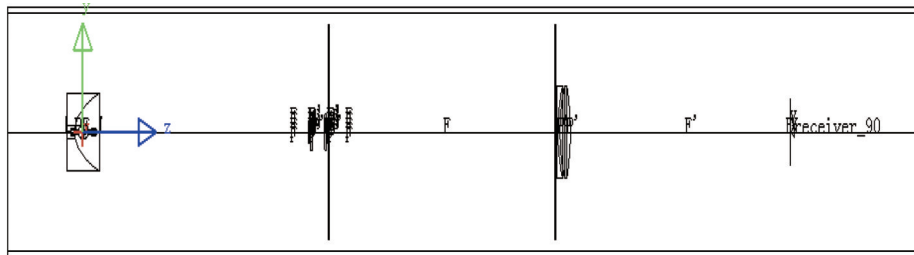


图6 采用双分离物镜的光学系统模型

Fig.6 Model of the optical system using the dual separated lens

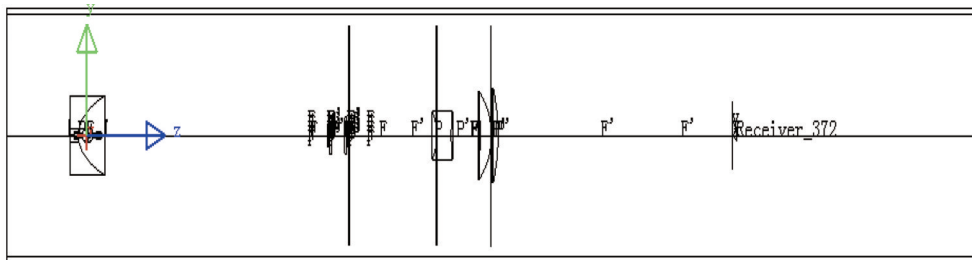


图7 采用望远物镜的光学系统模型

Fig.7 Model of the optical system using the telephoto lens

仿真过程中,追迹的光线数量为 2×10^7 条,辐照面上的接收面尺寸设为 $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$,划分的网格为 24×24 (探测器尺寸为 $\Phi 5 \text{ mm}$),图8(a)为采用双分离物镜时辐照面上的辐照度分布的线图表,图8(b)为辐照面上的栅格图表。图9(a)为采用望远物镜时辐照面上辐照度分布的线图表,图9(b)为辐照面上辐照度分布的栅格图表。

分析比较图8和图9,可见采用望远准直物镜时辐照面上的形状与采用双分离准直物镜一致,辐照面上的辐照度从原来的 52 W/mm^2 降低至 45.5 W/mm^2 ,同时辐照面上的均匀性也略有变差,但其不均匀度也在 $\pm 1\%$ 范围内。总之,采用望远物镜虽然使得太阳模拟器的技术指标略有降低,但太阳模拟光学系统却更加紧凑,系统的总长度从先前的 1330 mm 缩短到 1052 mm ,因此采用望远物镜实现太阳模拟器的小型化是可行的。

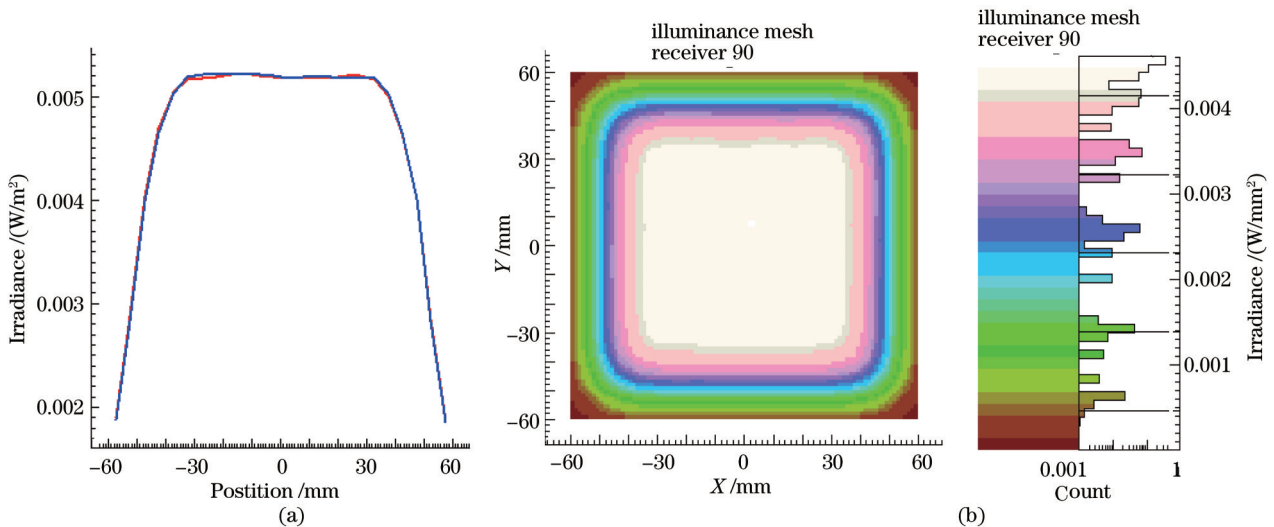


图 8 (a)辐照面上辐照度的线图表; (b)辐照面上辐照度的栅格图表

Fig.8 (a) Line chart of irradiance on the surface; (b) raster chart of irradiance on the surface

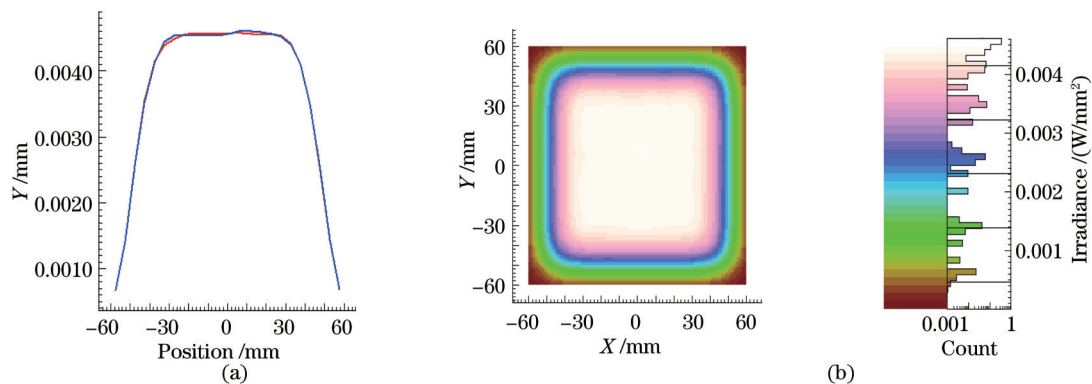


图 9 (a)采用摄远物镜的辐照面上辐照度线图表; (b)辐照面上辐照度分布的栅格图表

Fig.9 (a) Line chart of irradiance on the surface using telephoto lens; (b) raster chart of irradiance on the surface using telephoto lens

5 结 论

太阳模拟器是非成像光学领域的重要应用,太阳模拟光学系统的光路一般都比较长,为实现太阳模拟器的小型化,对太阳模拟的准直系统进行了研究,提出将具有短后截距的摄远物镜代替通常采用的双分离准直物镜,实现了太阳模拟光学系统的缩短,采用设计的三片式摄远型物镜,由于其像差较大,使得太阳模拟器的技术指标略有降低,后续可以继续研究和完善这种摄远物镜,从而实现太阳模拟器的小型化。

参 考 文 献

- Huang Bencheng. Space Simulator Design [M]. Beijing: Astronautics Press, 1994. 169-189.
黄本诚. 空间模拟器设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1994. 169-189.
- Wan Song. The Optical Design and Application of Solar Simulator and Applied Study [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.
万 松. 太阳模拟器的光学设计与应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- Gao Yue, Zhang Guoyu, Zheng Ru, *et al.*. Solar simulator irradiation uniformity based on optical integrator [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 06230031.
高 越, 张国玉, 郑 茹, 等. 光学积分器对太阳模拟器辐照均匀性的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 06230031.
- Liu Shi, Zhang Guoyu, Sun Gaofei, *et al.*. Design of an optical integrator for solar simulator [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(4): 467-470.
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.

- 5 Wang Guoming, Zhang Guoyu, Liu Shi, *et al.*. Optical system optimization of improving solar simulator irradiation uniformity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 012204.
王国名, 张金玉, 刘石, 等. 提高太阳模拟器辐照均匀性的光学系统优化设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 012204.
- 6 Dominguez Cesar, Anton Ignacio, Sala Gabriel. Solar simulator for concentrator photovoltaic system [J]. *Opt Express*, 2008, 16(19): 14894–14901.
- 7 A Damiano, I Marongiu, C Musio, *et al.*. Concentrator photovoltaic standards: experimental analyses of technical requirements [C]. *Industrial Electronics Society, IECON 2013–39th Annual Conference of the IEEE*, 2013. 8074–8079.
- 8 Denis Gaëtan Dufour. Laboratory Intercomparison of Ozone and Nitrogen Dioxide Spectral Intensities in the Visible and Infrared Using SCISAT-1 [D]. Canada: University of Toronto, 2006.
- 9 Frank Fischer, Beate Volkmer, Stefan Puschmann, *et al.*. Risk estimation of skin damage due to ultrashort pulsed, focused near-infrared laser irradiation at 800 nm [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2008, 13(4): 041320.
- 10 Liu Hongbo. Solar simulation technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(2): 177–181.
刘洪波. 太阳模拟技术[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(2): 177–181.
- 11 Zhong Jigong. On some questions in optical system of the solar simulator [J]. *Solar Journal*, 1983, 4(2): 187–193.
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.
- 12 Lu Yusun. Solar simulation concepts concerning prospective right angles [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1982, 5: 32–34.
卢榆孙. 太阳模拟中关于准直角的概念[J]. *中国空间科学技术*, 1982, 5: 32–34.
- 13 Zhong Min. Design of a Solar Simulator Irradiation Characteristics of the Optical System and Research [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2011.
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, 2011.
- 14 Liu Chaobo, Zhang Guoyu. The optical design of the solar simulator [J]. *Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 33(1): 14–17.
刘超博, 张金玉. 太阳模拟器光学系统设计[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 33(1): 14–17.
- 15 Liu Jun, Gao Ming. *Optical Design* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
刘钧, 高明. *光学设计*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- 16 Liu Xu, Li Haifeng. *Modern Projection Display Technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009. 168–180.
刘旭, 李海峰. *现代投影显示技术*[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2009. 168–180.