

气象辐射标定系统中太阳模拟器的设计

刘石¹, 张国玉^{1,2}, 孙高飞¹, 苏拾^{1,2}, 王凌云^{1,2}, 高玉军³

- (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;
3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了解决对太阳辐射测量仪器的检测问题, 提出一种高精度的气象辐射标定系统。重点阐述了系统中太阳模拟器聚光系统、光学积分器的优化技术; 详细论述了影响太阳模拟器均匀度的积分器像差以及积分器投影镜组的离焦效果, 并提出最佳离焦量的经验公式, 设计了准直光学系统, 并用 LightTools 软件对系统进行仿真; 最后, 对系统中的太阳模拟器进行测试。测试数据表明: 该太阳模拟器可模拟一个太阳常数, 辐照面范围为 $\Phi 200$ mm, 辐照不均匀度在 $\Phi 60$ mm 范围内小于 $\pm 1\%$, 在 $(\Phi 60 - \Phi 200)$ mm 范围内小于 2%, 不稳定性优于 $\pm 1\%/h$, 满足气象辐射标定系统的要求。

关键词: 太阳模拟器; 光学积分器; 光学设计; 不均匀性

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1345-05

Design of solar simulator in the meteorological radiation calibration system

Liu Shi¹, Zhang Guoyu^{1,2}, Sun Gaofei¹, Su Shi^{1,2}, Wang Lingyun^{1,2}, Gao Yujun³

- (1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement & Control Instruments, Changchun 130022, China;
3. Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to solve the problem that how to measure solar radiation measure instrument, a kind of high precision meteorological radiation calibration system was put forward. The optimization technique of focusing system and optical integrator was described; integrator aberration which influenced the uniformity of sun simulator in detail and defocusing effect of projector lens were discussed. The optimal defocus distance formula was put forward at the same time. The collimating optical system and simulated the system in LightTools were designed. Finally, solar simulator was tested. The results show that it can simulate one solar constant with irradiation range of $\Phi 200$ mm, working distance of 1 000 mm. Irradiation nonuniformity in 60 mm range is less than 1%, and in $(\Phi 60 - \Phi 200)$ mm is less than 2%, instability is better than 1%/h, which meets the requirements of meteorological radiation calibration system.

Key words: solar simulator; optical integrator; optical design; non uniformity

收稿日期: 2012-09-02; 修订日期: 2012-10-15

基金项目: 国家公益性行业科技专项资助(GYHY200706003, GYHY201006043); 吉林省科技发展计划(20118012)

作者简介: 刘石(1986-), 男, 博士生, 主要从事光学设计、航天器地面标定与测试。Email: 363860604@qq.com

导师简介: 张国玉(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 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。

Email: zh_guoyu@yahoo.com.cn

0 引言

随着全球气候问题越来越多地受到人们关注,对气候预测、气象辐射观测和太阳能资源观测等技术的要求也越来越高。太阳辐射测量仪器作为测量太阳总辐射和分光辐射的仪器,是提高目前气象观测计量检测水平的关键。然而,从已有太阳辐射测量仪器来看,普遍存在精度不高的问题,造成这样局面的主要原因是检测设备的落后。为了提高太阳辐射测量仪器检测设备的精度,满足更高的气象观测计量水平的要求,提出研制一种高精度的气象辐射标定系统。文中主要介绍该系统中太阳模拟器的研制方法。

太阳模拟器是一种在地面上模拟太阳光辐射特性的试验与测试设备,其主要作用是提供具有真实太阳光谱分布的、稳定的、均匀的太阳辐射源,且辐照强度可控制。在该系统中,针对太阳辐射测量仪器的室内灵敏度、非线性误差、余弦响应误差、方位响应误差、倾斜误差等性能参数的测试需求,开展气象用太阳模拟器及其关键技术研究,重点解决太阳光辐射均匀性问题。

1 气象辐射标定系统

气象辐射标定系统的功能是对太阳辐射测量仪器的各个参数进行检测和标定,保证太阳辐射测量仪器的精度和工作稳定性。主要有高精度太阳模拟器和多维旋转转台两部分组成,如图 1 所示。

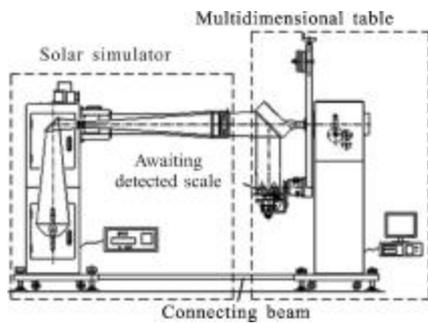


图 1 气象辐射标定系统的总体布局图

Fig.1 General layout of meteorological radiation calibration system

太阳模拟器发出亮度均匀的光,经过多维旋转转台的平面反射镜后,照射到待检太阳辐射测量仪器上。待检太阳辐射测量仪器对接收到模拟的太阳光进行分析处理,得到自身参数的校准值,由此完成

对太阳辐射测量仪器的标定工作。

2 太阳模拟器的组成及工作原理

该系统中的太阳模拟器采用了同轴透射式准直光学系统,主要由椭球面聚光镜、光源光学积分器(场镜与投影镜)、附加镜、视场光阑、准直系统组成,如图 2 所示。

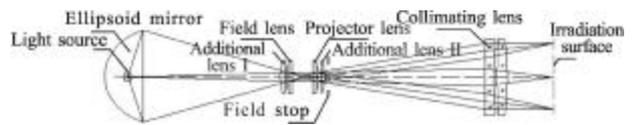


图 2 太阳模拟器的组成及工作原理图

Fig.2 Composition and working principle

用具有轴对称性且接近太阳光谱的短弧氙灯作光源,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)形成一幅照度分布^[1-2],这个分布被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,形成一个辐照度均匀分布的辐照面。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光学积分器,如同来自“无穷远”处的太阳,从而模拟了太阳光辐射。

3 太阳模拟器中椭球聚光镜的设计

考虑到太阳模拟器光源——氙灯的发光特性,在聚光系统设计时采用包容角很大的椭球聚光镜。椭球聚光镜自身利用两焦点的成像关系,将第一焦点上的氙弧以一定的汇聚角和放大倍率投影在第二焦点面上^[3]。图 3 给出的是椭球聚光镜的外形尺寸图。

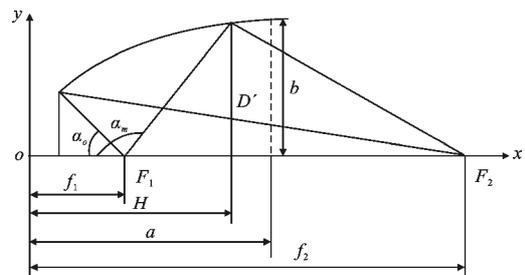


图 3 椭球聚光镜外形尺寸图

Fig.3 Ellipsoid condenser outline dimension

根据椭圆的性质在子午面内椭圆的方程式为:

$$y^2=2Rx-(1-e^2)x^2 \tag{1}$$

式中:R 为椭圆顶点的曲率半径, $R=\frac{2f_1f_2}{f_1+f_2}$; e 为椭圆离心率, $e=\frac{f_1-f_2}{f_1+f_2}$; f_1 为椭圆的第一焦点; f_2 为椭圆的第二焦点。

椭球聚光镜不同环带对第一、二两个焦面的成像倍率是孔径角 u 的函数, 即:

$$M_u=(e^2+2ecosu+1)/(e^2-1) \tag{2}$$

因此, 位于第一焦点上的氙弧经聚光镜不同环带成像到第二焦点上所形成的辐射通量分布范围不同。第二焦点上辐射通量的总分布是各环带形成的各子分布的叠加。

为充分利用光能, 椭球聚光镜的包容角即 $\alpha_m-\alpha_0$ (如图 3 所示) 取值越大越好, 椭球聚光镜对氙弧辐射通量包容角的大小就称为聚光效率, 定义为聚光镜汇聚到第一焦面的辐射通量占氙弧发出的全部辐射通量的比率 K_c 。 K_c 取决于氙弧辐射强度在不同方向上的相对分布 $t(u)$ 和椭球聚光镜汇聚角的范围, 其表达式为:

$$K_c=\frac{2\pi \int_{\alpha_0}^{\alpha_m} t(u)\sin u du}{2\pi \int_{0^\circ}^{180^\circ} t(u)\sin u du} \tag{3}$$

可以说聚光镜第一焦面内的辐照度分布决定了被照面内的平均辐照度和辐照不均匀度, 并可作为评价聚光镜光学设计和确定光学积分器光通道数目的依据。在选择适当近轴倍率的情况下, 只能靠离焦来改善辐照面上辐照不均匀度这一重要技术指标。

可以使用下面的设计方法来提高聚光镜光学设计质量。椭球面方程式为:

$$y^2=ax+bx^2 \tag{4}$$

加入 x 的其他幂次项, 使方程式变为高次方程:

$$y^2=ax+bx^{3/2}+cx^2+dx^{5/2}+ix^3+\dots \tag{5}$$

式中: x 低次幂项系数大, 高次幂项系数小。因此在近轴范围内, x 的低次幂项对聚光镜面形起主导作用; 在聚光镜远轴范围内, x 的高次项起到修正原椭球面形的作用。根据这一思想, 在设计中借助于 x 项的幂次与其系数的互相匹配控制聚光镜的面形。保持 y 随 x 递增的变化过程, 即保证了聚光镜整个面形的连续性。用这种方法在提高聚光镜聚光效率的同时可改进其第二焦面内辐照分布。

4 太阳模拟器中积分器的设计

太阳模拟器中的积分器, 主要作用在于保证均匀照明。它把光源经聚光镜在场镜组通光口径内所形成的照度分布, 经场镜元素分割, 投影镜元素成像, 由叠加透镜 L2 叠加成像, 然后传递到最佳辐照平面上, 从而实现了均匀照明。积分器由两组前后排列的透镜阵列组成, 前组透镜阵列为场镜组, 后组透镜阵列为投影镜组, 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, 其结构图如图 4 所示。

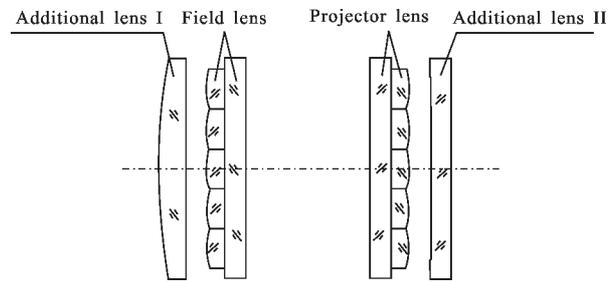


图 4 光学积分器结构图

Fig.4 Optical integrator structure

光学积分器只改善理想均匀性, 而由光学像差产生的辐照不均匀度误差, 要靠对光学系统的优化设计完成, 特别是对光学积分器的优化设计。因此, 对于积分器的设计, 要注意以下两个方面:

(1) 积分器像差对均匀性影响

由像差理论可知, 增大像面弯曲、畸变、光阑彗差等像差可提高像面上轴外点的辐照度, 从而提高整个辐照面内的照度分布均匀性^[4]。光学积分器成像的共轭关系如图 5 所示, 场镜元素位于均匀辐照面的共轭面, 即物面上; 投影镜元素位于聚光镜出瞳的共轭面, 即光阑上。图中只给出光学积分器中心光通道的成像关系, 其周围光通道的成像关系与此相同。由像差分析可确定积分器元素透镜的弯曲状态。物面畸变和光阑彗差受到场镜元素透镜弯曲的影响, 增大场镜的物面畸变, 则均匀辐照面轴外点光线高度向辐照面中心收敛, 减小了均匀辐照面边缘辐照度过渡带的宽度, 所以增大场镜物面畸变有利于提高辐照均匀度。但在增大物面畸变时场镜元素透镜的光阑彗差和光阑球差也会增大, 这样在光学积分器成像时, 由于场镜组元素透镜光阑轴外球差的影

响,使得经场镜元素透镜边缘带的部分光线落入与其同光通道的投影镜元素透镜外面,成为有害的杂光,减小了辐照面边缘带的辐照度,从而降低了辐照面均匀性。但是实际上光学积分器元素透镜是靠光胶工艺制作的,彼此间无机械间隔,由于光阑轴外球差大而落到场镜元素同光通道中投影镜元素口径外的光线,其实是落入相邻光通道中投影镜元素口径的边缘,最后投射到均匀辐照面的外围^[5]。笔者认为,场镜元素透镜应当处于光阑球差小的弯曲状态。

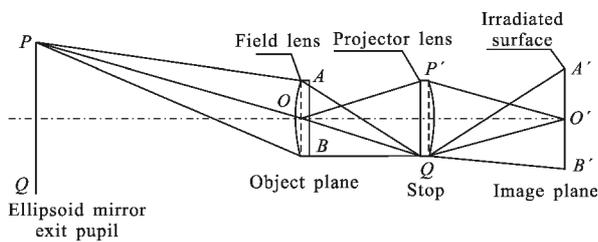


图 5 光学积分器成像原理图

Fig.5 Optical integrator imaging principle

(2) 投影镜离焦对均匀性影响

投影镜元素透镜位于光阑上,它的弯曲不影响光阑球差,也就不会影响物面畸变和光阑彗差。为减小像面上成像光线的离散尺寸,投影镜元素透镜的弯曲应处于物面球差极小值的状态^[6-8]。但是为使太阳模拟器系统结构紧凑,积分器相对孔径需要取得大些,这样即使投影镜处于球差极小值状态,其球差和轴外球差也很大。此外,由于像差的存在,光学积分器对称光通道内光线的成像高度不一致。这两点原因使均匀辐照面内的成像光线离散很大,对系统的辐照均匀度相当不利。缩短场镜组和投影镜组之间的间隔可明显减小这种离散尺寸,其实质是使投影镜离焦^[9-10]。

5 太阳模拟器中准直光学系统设计

准直光学系统通常根据均匀辐照面直径的大小选定,文中采用的是同轴透射式准直系统。这种系统可以有效地利用光能,并且中心无遮挡。由于准直镜口径过大,且视场角较小,准直镜应选用双分离的结构形式^[6]。这种结构形式可较好地校正球差、色差和正弦差等某些像差,改善输出光束的准直性和辐照均匀性。准直物镜结构图、像差特性曲线图、球差及色差曲线图如图 6、7、8 所示。

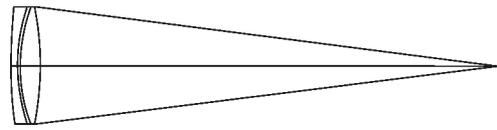


图 6 准直物镜结构图

Fig.6 Construction diagram of collimator lens

图 7 中表明该准直物镜中心波长 D 光的球差为零,而在 $0.707 h_m$ 处具有最大球差说明该系统对球差已经校正。同时,通过此图可以看出,在 $0.707 h_m$ 处的 C 光和 F 光相交,即色差为零,表明该系统对色差也基本校正;由此交点到 D 光曲线之间水平距离为二级光谱,由于该系统是用于照明的系统,所以在这里不过分强调对二级光谱的校正^[11]。

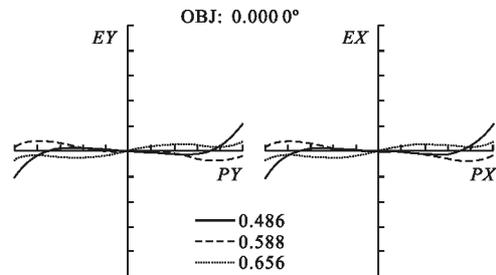


图 7 像差特性曲线

Fig.7 Characteristic curves of system aberration

图 8 中是物镜系统像差特征曲线图,可知该系统的整体像差很小,彗差几乎为零,其他各种像差也由于视场较小而变得很小,满足照明系统中对像差的校正,有利于辐照面的均匀性设计。

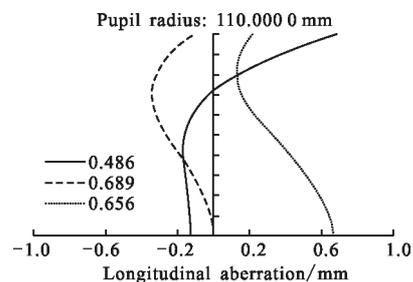


图 8 球差及轴向色差曲线图

Fig.8 Curves of spherical aberration and axial chromatic aberration

6 系统仿真及数据测试

使用 lightTools 软件在给定光学设计参数的基础上,对 2000 万条光线进行蒙特卡洛光线追迹,并不断地对设计参数进行仿真调试,系统仿真结果如图 9 所

示。根据图中数据可以看出,仿真结果满足设计要求。

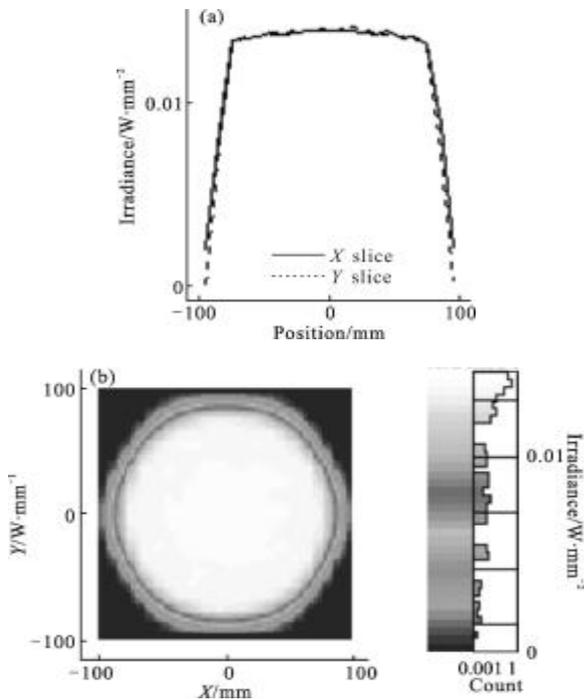


图 9 仿真结果图

Fig.9 Simulation results

同时,在辐照面上对辐照不均匀度进行了测试,测试数据如表 1 所示。

表 1 测试数据

Tab.1 Text data

Diameter/mm	$\Phi 30$	$\Phi 60$	$\Phi 100$	$\Phi 150$	$\Phi 200$
Max value/ $W \cdot m^{-2}$	1 379	1 379	1 379	1 379	1 379
Min value/ $W \cdot m^{-2}$	1 371	1 365	1 358	1 346	1 332
Nonuniformity/%	0.3	0.5	0.8	1.2	1.7

从实验结果可以计算出辐照不均匀度,在 $\Phi 60mm$ 范围内为 0.5%,在($\Phi 60 \sim \Phi 200$) mm 范围内为 1.7%,与仿真结果相符,且满足技术指标的要求。

7 结 论

文中介绍了一种应用于气象辐射标定系统中的太阳模拟器,重点分析了太阳模拟器中光学积分器像差、投影镜离焦对辐照均匀性的影响,阐述了太阳模拟器聚光系统、光学积分器准直系统的优化技术,

并使用 LightTools 软件对所设计的太阳模拟器进行了光学仿真,仿真结果与最后测试结果相一致:在 $\Phi 60mm$ 范围内不均匀度为 0.5%,在($\Phi 60 \sim \Phi 200$) mm 范围内不均匀度为 1.7%,满足气象辐射标定系统的技术指标要求。

参考文献:

- [1] Wang Jun, Huang Bencheng, Wan Caida, et al. Environment simulation technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [2] Eddy. Design and construction of the JPLSS15B solar simulate[C]//USA: Third Space Simulation Conference, 1968. (in Chinese)
- [3] Zhang Guoyun, Lv Wenhua, He Xiaolei et al. Analysis on irradiation uniformity of sun simulator [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(1): 41-45. (in Chinese)
- [4] An Guifang, Zhang Guoyu. Research of the solar simulator for weather sonde experiment [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(9): 1408-1412. (in Chinese)
- [5] Zhong J G. On some questions in optical system of the solar simulator [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 1983, 4(2): 187-193. (in Chinese)
- [6] Zhang Yimo. Application Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
- [7] Wang Yuan, Zhang Linhua. Design of a new type of full-spectrum solar simulator [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006, 27(11): 1133-1136. (in Chinese)
- [8] Liu Hongbo. Solar simulator technique [J]. Opt Precision Eng, 2001, 9(2): 177-181. (in Chinese)
- [9] Cao Zhaolou, Zhan Zhenxian, Wang Keyi. Structural design of spherical compound eye lens for moving object detection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(1): 71-73. (in Chinese)
- [10] Ke Caijun, Yi Xinjian, Lai Jianjun. Research microlens array for improving the fill factor of CCD image sensors. Infrared and Laser Engineering [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(2): 209-212. (in Chinese)
- [11] Huang Lei, Hu Wenwen, Yang Zhiwen. Optical design of wide bands and long focal length collimating lens. Infrared and Laser Engineering [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S): 126-127. (in Chinese)