
文章编号 1674-2915(2010)02-0104-08

太阳模拟技术

高雁, 刘洪波, 王丽

(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:概述了国内外太阳模拟技术的发展现状。提出了太阳模拟器设计的技术指标,讨论了太阳模拟器的光学系统设计思想。介绍了聚光系统、光学积分器、准直系统、滤光片光谱透过率的优化设计方案,通过复合高次非球面聚光系统和非共轴深椭球面反射镜的使用,提高了聚光镜对光源辐射通量的聚光效率,改善了第二焦面上的辐照分布。通过对光学积分器原理及像差分析,给出了有效的优化设计经验公式。最后,对研制过程中遇到的问题进行了归纳总结,并提出了改进思路。

关键词:太阳模拟技术;太阳模拟器;光学设计

中图分类号:V524.2 **文献标识码:**A

Solar simulation technology

GAO Yan, LIU Hong-bo, WANG Li

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: This paper introduces the development of solar simulation technology, gives design specifications of solar simulators, and then discusses the design and improvement of optical systems of solar simulators in detail. Several design methods of the condenser system are proposed, especially, a compound high-order aspheric surface condenser system and a non-coaxial ellipsoidal mirror are presented to raise the concentration efficiency of condensers and improve the irradiance distribution of the second focal plane. As the design of optical integrators is based on the Gaussian optical theory and its optimization is guided by the aberration theory, it presents an effective empirical formula for optimum design of optical integrators. This paper also briefly analyzes the design of collimating systems and the transmittances of filters. Finally, the current problems existed in the process of development are summarized and several improved ideas are put forward.

Key words: solar simulation technology; solar simulator; optical design

1 引言

太阳模拟器是在室内模拟不同大气质量条件下太阳光辐照特性的一种试验或定标设备。太阳模拟技术的发展与我国空间科学技术的发展密切相关,应用太阳模拟技术研制的太阳模拟器已成为我国空间科学在地面进行空间环境模拟试验研究的重要组成部分。太阳模拟器多用于空间飞行器的环境模拟试验,为航天器提供与太阳光谱分布相匹配的、均匀的、准直稳定的光辐照。在航天器真空热环境试验中,太阳模拟器是最真实准确的热流模拟手段。应用太阳模拟器可以高精度地完成航天器热平衡试验,特别是形状复杂、热耦合关系复杂的航天器的热平衡试验,必须用太阳模拟器来完成。

在空间技术应用的其他方面,例如人造卫星飞行姿态控制用太阳角计的地面模拟试验与标定,地球资源卫星多光谱扫描仪太阳光谱辐照响应的地面定标,太阳光伏科学与工程中光电转换器件太阳能电池的检测,遥感技术中室内模拟太阳光谱辐照,生物科学中研究植物发育与培育良种等,都广泛地应用太阳模拟器。

2 国内外研究状况

我国从1965年开始设计研制太阳模拟器,先后研制了KM2太阳模拟器,KFT高精度小型太阳模拟器和KM4太阳模拟器等太阳模拟设备,并成功地应用于整星和部件的热真空试验。

美国从1959年开始研制大型太阳模拟器,初期面临的主要问题是辐射源的能量低,60年代中后期至70年代,由于使用了大功率氙灯,这一问题得到了解决。美国波音公司研制的A-7000大型太阳模拟器采用了同轴准直光学系统,使用37只30 kW氙灯,得到直径为6.1 m的辐照面积,其辐照不均匀度为 $\pm 10\%$ 。1966年建成的美国JPLSS15B太阳模拟器,采用了离轴准直光学系统,其离轴角为 14° ,使用37只20 kW的氙灯,准

直镜为直径6 m的整镜,试验面直径为4.6 m。由于积分器系统的使用,有效地提高了辐照均匀性,其辐照不均匀度为 $\pm 4\%$,光谱为修正氙灯光谱。为了满足星际探测的需要,1972年该太阳模拟器做了改造,研制了两个新的积分器,一个用来产生直径3.4 m的光柱,另一个用来产生直径2.7 m的光柱,并且研制了一块新的准直镜,用来产生直径2.7 m的光柱。这一改造使该太阳模拟器在直径3.4 m的辐照面上辐照度可以达到8个太阳常数,在直径2.7 m的辐照面上辐照度可以达到12个太阳常数。

德国1983年建成的大型太阳模拟器,采用离轴准直光学系统,离轴角为 27° ,辐照直径为3.6 m,辐照不均匀度为 $\pm 4\%$ 。该太阳模拟器后来做了两处改进,把积分器单元镜由圆形改为矩形,准直镜单元镜由61块六边形镜增加到84块。此外,扩大准直镜口径,增加了辐照面积并改变了辐照面形状,改造后该设备通过更换积分器可分别得到3.6 m的辐照面和 $3.05\text{ m} \times 4.5\text{ m}$ 的辐照面^[1]。

欧空局1983年在荷兰建成的大型太阳模拟器,吸取了各国的成熟技术和经验,采用了离轴准直光学系统,其离轴角为 29° ,可选用19只20、25或32 kW的氙灯,辐照直径为6.05 m,深为6 m,辐照面不均匀度为 $\pm 4\%$,体不均匀度为 $\pm 6\%$ 。该太阳模拟器代表了当今大型太阳模拟器的先进水平^[2]。

此外,俄罗斯、印度等国也建成了大型的太阳模拟器用于航天器试验。

3 太阳模拟器设计技术指标

由于在实验室内人工模拟太阳光辐照特性具有一定的局限性,真实模拟还具有一定的难度。例如模拟器模拟太阳光束孔径角和总辐照度就是一对矛盾,在满足其中一项的情况下很难满足另一项。因此,在研制各种不同用途的太阳模拟器时其性能指标都应有所侧重。对高准直光束太阳模拟器来说应侧重精确模拟太阳光束的准直角

(±16′),而对辐照度指标要求不做太多的苛刻要求;反之,应用于空间环境热真空环境实验的太阳模拟器,其输出辐照度指标必须要达到一个太阳常数(1 367 W/m²),因此,这种类型的太阳模拟器输出光束的准直角较之真实太阳的要大。研制太阳模拟器的主要设计指标有^[3]:

(1)太阳光谱总辐射为 AMO 标准太阳光谱总辐射。AMO 是日地平均距离处地球大气层外的太阳光谱总辐射量。此时的太阳总辐射量称之为一个太阳常数,其定义为在此处垂直于太阳辐射光的单位面积上,单位时间内接收的太阳辐射量,其值为(136.7 ± 2.1) mW/cm²;

(2)太阳光束准直角 ±16′;

(3)辐照不均匀度通常分为面辐照不均匀度和空间辐照不均匀度,按下式计算:

$$\Delta E/E_{\text{sum}} = \pm \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:ΔE/E_{sum}为辐照不均匀度;E_{max}为辐照面上(或体积内)的辐照度最大值;E_{min}为辐照面上(或体积内)的辐照度最小值;

(4)辐照不稳定性表征辐照度随时间的变化,由下式决定:

$$(\Delta E/E_{\text{sum}})/t = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{t(E_{\text{max}} + E_{\text{min}})} \times 100\% \quad (2)$$

式中:(ΔE/E_{sum})/t为时间t内的辐照不稳定性;

(5)光谱失配偏差表征与标准太阳光谱的匹配精度,分为 A、B 和 C 级;

此外,太阳模拟器输出的有效辐照面积也是设计指标之一。

4 太阳模拟器光学系统

太阳模拟技术所涉及到的光学系统是一种复杂的强光照明系统^[4]。与其它光学系统不同,在光学系统设计中,并不是把消除系统的像差,提高成像质量作为主要研究对象,而是把注意力集中在如下几个方面:其一是选择合理的光学系统,优化光学设计参数,在满足辐照度要求的前提下,

尽可能地提高试验空间的辐照均匀度;其二是优化设计聚光系统,提高对光源辐射能量的利用率。因此,其光学系统的设计思想和结果的评价方法与通常的光学系统设计相比另有特点。在此,本文仅对聚光系统、光学积分器、准直系统和滤光片光谱透过率等设计进行讨论。

图1是普通折射式准直型太阳模拟器光学系统,光路基本工作原理如下:位于椭球镜第一焦点附近氙灯氙弧发出的光辐射通量,经椭球面聚光镜汇聚并反射,以给定的包容角投影到椭球聚光镜第二焦面上,形成一个较大范围的辐照分布。这个较大范围的辐照分布被位于第二焦面上的由N个小元素透镜组成的光学积分器场镜阵列对称分割成N个小的辐照范围,再经光学积分器投影镜阵列中对应的元素透镜迭加成像到无穷远,形成一个较均匀的辐照范围。这N个被成像到无穷远的“辐照范围”再经准直系统以一定的照明孔径角(即准直角)投影到准直物镜的后焦面附近,形成一个较均匀辐照面。朝准直透镜看去,辐照光束来自位于准直透镜焦面上的光学积分器投影镜组,如同来自“无穷远”处的太阳。滤光片使输出光束的光谱辐照分布与 AMO 或 AM1.5 标准太阳光谱辐照分布在规定的精度级别内相匹配。

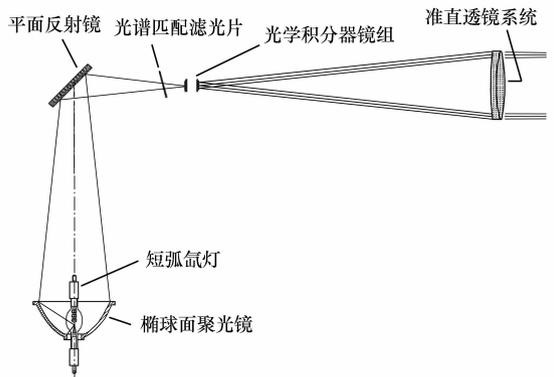


图1 准直型太阳模拟器光学系统示意图
Fig. 1 Optical system diagram of collimating solar simulator

4.1 聚光系统

内反射椭球镜是一种很好的聚光元器件,也是通常太阳模拟器所用聚光系统。它利用两焦点

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上。如图2所示,根据椭圆的性质在子午面内椭圆方程式为:

$$y^2 = 2Rx - (1 - e^2)x^2, \quad (3)$$

式中: R 为椭圆顶点的曲率半径, $R = \frac{2ff'}{f+f'}$; e 为椭圆离心率, $e = \frac{f-f'}{f+f'}$, f 和 f' 分别为椭圆的第一、第二焦点。

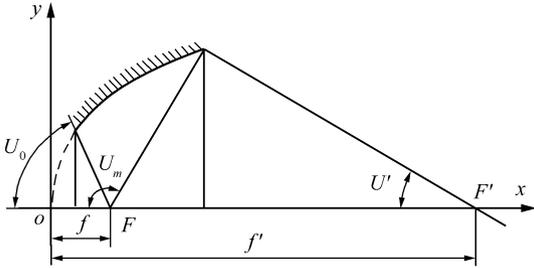


图2 椭圆的成像特性

Fig. 2 Elliptical imaging characteristics

椭球面聚光镜表面可化分成许多环带,每一环带的宽度由给定的 Δu 限定,聚光镜各环带的成像倍率 Mu 是孔径角 u 的函数,如图2所示。由拉氏不变量得:

$$hntan u = h'n'tan u', \quad (4)$$

其中 $n = -n' = 1$;

系统的放大倍率为:

$$Mu = h'/h = -\tan u / \tan u' = -PF'/PF, \quad (5)$$

其中 $PF + PF' = 2a$, a 为椭圆之半长轴。

根据椭圆在极坐标系中的表示式,将线段 PF' 、 PF 表示成如下形式:

$$PF = a \frac{1 - e^2}{p + e \cos u}; \quad (6)$$

$$PF' = 2a - PF = a \frac{e^2 + 2e \cos u + 1}{1 + e \cos u},$$

式中 $p = a(1 - e^2)/e$, $2a = f + f' = 2p/(1 - e^2)$ 。

整理后得:

$$Mu = -PF'/PF = \frac{e^2 + 2e \cos u + 1}{e^2 - 1}, \quad (7)$$

上式即为成像倍率 Mu 和孔径角 u 的关系式,当 u 趋于零时,近轴倍率 $M_0 = f'/f$ 。

内反射椭球镜对氙弧辐射通量包容角的大小称为聚光效率,定义为聚光镜汇聚到第二焦面的

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 $t(u)$ 和聚光镜汇聚角的范围,其表达式为:

$$K_c = \frac{2\pi \int_{U_0}^U t(u) \sin(u) du}{2\pi \int_0^{180^\circ} t(u) \sin(u) du}. \quad (8)$$

聚光镜第二焦面给定口径内所接收的来自聚光镜的辐射通量占聚光镜汇聚到第二焦面辐射通量的比率称之为该口径的辐射通量利用率 K_i ,显然 K_i 取决于第二焦面上辐射通量的相对分布。因此,可以说聚光镜第二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。理想的在聚光镜第二焦面内的辐照度分布曲线如图4所示,近似于正态分布。在反射式椭球面聚光镜的光学设计中其成像倍率和氙弧峰值亮度点相对于第一焦点的离焦量是两个重要参数。

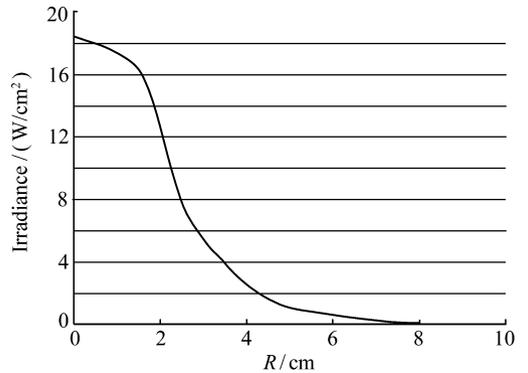


图3 聚光镜第二焦面辐照度分布曲线

Fig. 3 Irradiance distribution curve on the second focal plane of condenser

提高反射式聚光镜对光源辐射通量的聚光效率,改善第二焦面上的辐照分布一直是太阳模拟技术所追求的目标。L. F. Polak 等人曾将聚光镜的孔径角每隔 10° 划分为一个环带,氙弧峰值亮度点经这种环带投射到参考面内给定的瞄准点上,瞄准点在参考面内到轴上点的径向距离确定了该环带的面形,每个环带分别选择11个位置不同的瞄准点。在这种方法中,由于各个环带分别选择瞄准点,故各环带组合后出现环带间的不连续。实际上对于给定环带,瞄准点位置不同的作

用相当于单一椭球面情况下氙弧峰值亮度点的离焦量不同^[5]。

利用对二次曲线方程进行微量的修正方法,可增加反射式聚光镜的利用率并改善第二焦面上的辐照分布。在选定的椭圆方程式: $y^2 = ax + bx^2$ 中加入 x 的其它幂次项,使方程变为高次方程

$$y^2 = ax + bx^{3/2} + cx^2 + dx^{5/2} \dots, \quad (9)$$

式中 x 低次幂系数大,高次幂系数小,故在近轴区域内 x 低次幂项对聚光镜面形起主要作用,与原二次曲面偏离很小;随着 x 值增加,高次项对面形影响增大,故在聚光镜远轴区域内 x 的高次项对原椭球镜进行了修正。实践证明,这种方法保证了聚光镜整个面形的连续性。

另外,一种非共轴深椭球面反光镜也可改善在第二焦面上的辐照分布。如图4所示,以 F_1 为中心将椭圆曲线 Σ 的长轴相对光轴 x 转动角度 Δ 得到新椭圆曲线 Σ' ;再绕光轴 x 旋转 Σ' ,得到回转曲面即非共轴椭球面。如在非共轴椭球面 Σ' 的第一焦点 F_1 处放置一发光点,在 F_2 处第二焦点垂直光轴平面上会形成一个光环,如图4所示。光环半径为:

$$F_1 F'_2 = F_1 F_2 \tan \Delta, \quad (10)$$

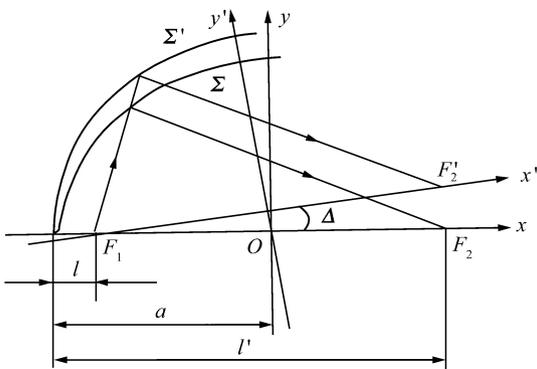


图4 非共轴椭球面反射镜

Fig. 4 Non-coaxial ellipsoidal mirror

光源实际上有一定大小,是由无数个发光点组成的,所以光源的像即为无数个光环叠加的结果。如果能合理选取非共轴椭球面成像倍率 M_0 及转角 Δ ,再考虑到光源相对于非共轴椭球镜的微量离焦,将大大提高第二焦面处的辐照度分布均匀性,同时可提高聚光镜第二焦面给定口径内辐射通量的利用率 K_i 。

为计算简单,选取坐标原点为椭圆中心(图5中 O 点),转动后椭圆曲线方程用 $x'y'$ 表示,有:

$$\frac{x'^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2} = 1, \quad (11)$$

式中 a 、 b 分别为椭圆长和短半轴, $a = 1/2(l + l')$, $b = \sqrt{ll'}$ 。坐标 x' 、 y' 和 x 、 y 的关系式为:

$$\begin{aligned} x &= (x' + c) \cos \Delta - y' \sin \Delta - c \\ y &= (x' + c) \sin \Delta - y' \cos \Delta, \end{aligned} \quad (12)$$

式中 $c = \sqrt{a^2 - b^2}$ 。

光轴转角 Δ 可由式(10)根据对光环的要求和对系统的外形尺寸计算确定,按式(12)可计算确定非共轴椭球面的参数及面型,这样不但提高了光能利用率,同时也显著改善了工作面上聚焦光斑上光照度的均匀性。

4.2 光学积分器

光学积分器的作用是将氙弧在椭球聚光镜第二焦面形成的氙弧像对称分割,叠加再成像,从而得到一个均匀辐照面。如图5所示,场镜元素透镜与均匀辐照面共轭,投影镜元素透镜与聚光镜出瞳共轭。图示为光学积分器中心光通道的成像关系,其余光通道也与此相同。

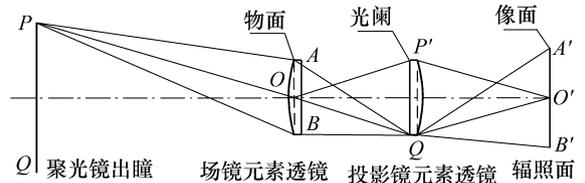


图5 光学积分器成像原理图

Fig. 5 Imaging principle of optical integrator

光学积分器各光通道对系统主光轴是对称排列的,共用一个叠加透镜,除中心光通道光轴与叠加透镜光轴同轴外,其余光通道中的叠加透镜相应通光口径对所在光通道的光轴已失去对称性,这使得光学积分器的成像失去了严格轴对称性。

场镜元素透镜位于物面上,它的“弯曲”将影响物面畸变和光阑彗差。增大物面畸变,均匀辐照面上的光线高度向辐照面中心收敛,缩小了均匀辐照面边缘照度过渡带的宽度,对提高均匀度有利。但在增大物面畸变时会同时增大光阑彗差,而场镜元素透镜光阑彗差大时其光阑球差也大。理论上,光学积分器系统中聚光镜的出瞳经

场镜元素透镜成像在同一光通道中的投影镜元素透镜的口径内,但大的光阑轴外球差使得由聚光镜出瞳边缘发出的经场镜元素透镜口径边缘带的那些成像光束中,有相当一部分落入同一光通道的投影镜元素透镜的口径之外,成为有害杂光。这实际上降低了辐照面边缘的辐照度,也降低了辐照面的均匀度,同时减少了均匀辐照面内的有效辐照度。

由以上分析可知,从物面成像和聚光镜出瞳成像两个方面考虑,会得到不同的结论。在大多数小型太阳模拟器中,积分器元素透镜是靠光胶工艺制作的,彼此间无机械间隔。因此,由于轴外球差大而落入相邻光通道的光线实际上落入相邻光通道中投影镜元素透镜口径的边缘,最后投射到均匀辐照面的外围。因此,认为场镜元素透镜应处在光阑球差小的“弯曲”状态。

光学积分器由于光学材料和结构的限制本身不能校正像差,因此,如果系统取过大的相对孔径时,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,使均匀辐照面内的成像光线离散很大,对系统的辐照不均匀度相当不利。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。

通过以上分析并对光学参数不同的几个太阳模拟器系统计算,结果如下:

1) 辐照面到准直镜有一个最佳距离,当处于这个最佳距离时,对称光通道内对应光线在辐照面上成像高度相同。

2) 投影镜组离焦可以补偿大的轴外球差造成的成像光线离散量。

3) 场镜和投影镜的最佳距离 l_0 为理论计算值 l 缩短 Δl 。对于近轴光学间隔的改变量 Δl 与投影镜元素透镜单独对于无穷远物点成像时边缘带球差 $LA'_m(\infty)$ 的定量关系可由下面的近似公式给出:

$$\Delta l = (2.1 \sim 2.2) LA'_m(\infty). \quad (13)$$

4) 当场镜和投影镜间距为 l_0 时,光学积分器边缘光通道和中心光通道在辐照面中心处成像光线离散尺寸相等且最大,在辐照面边缘处成像光

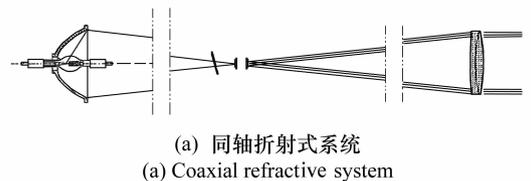
线离散尺寸相等且最小。这种从辐照面中心到边缘光线离散尺寸由大到小的变化对均匀度是有利的。

利用上述的补偿方法,在积分器相对孔径较大时也能获得较好的均匀度。

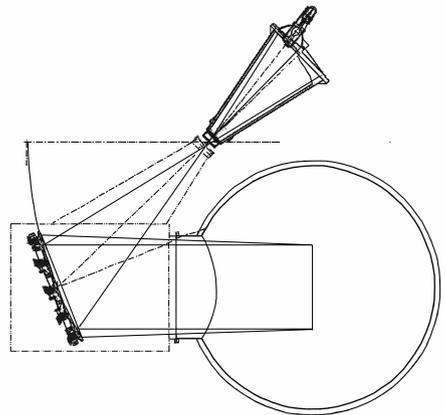
4.3 准直系统

通常根据准直系统的类型对太阳模拟器进行分类。准直系统的类型决定了太阳模拟器的总体结构方案和总体技术指标。因此,根据使用要求和实际工况合理地选定准直系统是总体方案论证中的重要内容。

太阳模拟器的准直系统可分为同轴折射式系统与离轴反射式系统两类。如图6所示,在小型太阳模拟器中,由于辐照面积直径小,一般采用同轴折射式系统,其准直物镜的形式通常选用双胶合或双分离结构,这两种形式的透镜结构可对球差、正选差以及色差进行校正,改善输出光束的准直性和辐照面的体均匀度。在大型太阳模拟器中,一般采用离轴反射式准直系统。设计这样的系统时应注意试验体二次或多次反射杂光问题,应将辐照面设计在准直镜法线外侧范围内。由于



(a) 同轴折射式系统
(a) Coaxial refractive system



(b) 离轴反射式系统
(b) Off-axis reflective system

图6 按准直物镜形式分类的太阳模拟器

Fig. 6 Solar simulator sorted by collimating field lens

离轴系统结构上失去了对称性,积分器形成的均匀辐照面经过离轴反射后,辐照度分布失去对称性,这是该系统的不足之处。作为适当的补偿,可以调节氩弧位置,改变场镜组口径内辐照度分布的中心对称性。

4.4 滤光片光谱透过率

在光源和光学系统确定后,太阳模拟器光谱辐照分布特性取决于滤光片的光谱透过率。通过直接测量得到不具有滤光片的太阳模拟器的光谱辐照分布,或者直接测量光源的光谱辐射分布并计入太阳模拟器光学系统的光谱“透过”率的影响来推得太阳模拟器的光谱辐照分布。将这一分布与已知的标准太阳光谱辐照分布相比较,可计算出滤光片光谱透过率的理论值,即^[6]:

$$a = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} b, t = C/Ka, \quad (11)$$

这里 a 和 b 分别表示不具有滤光片的太阳模拟器在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内的辐照度和光谱辐照度分布。 C 表示同一波段内标准太阳光谱辐照度, t 为该波段内滤光片的光谱透过率理论值, K 则为太阳模拟器全波段辐照度归一到标准太阳全波段辐照度的归一化因子。如果只要求给出滤光片光谱透过率的相对值, K 在公式中可以省略,由已知的 C 和测得的 a , 通过式(11)可计算出 t 。

目前受真空镀膜手段和工艺水平的限制,实际镀制的滤光片的光谱透过率还不能完全符合所要求的光谱,而实际上只需按给出透过率最低点的波长位置、半宽度及透过率 t_λ 镀制滤光片就能满足要求。一般来说最低透过率在 $(0.93 \pm 0.05) \mu\text{m}$ 处, t 为 0.34 ± 0.03 , 半宽度为 $0.86 \sim 1.00 \mu\text{m}$ 。

5 结束语

在高准直太阳模拟器中,光学系统对光源辐

参考文献:

- [1] FEIL O G, FREY H-U. Solar simulation with rectangular beam [C]//Proceedings of the 15th Space Simulation Conference. 1-3 November Williamsburg 1988, NASA Conference Publication 3015, p278-288.
- [2] BRINKMAN P W. Main characteristics of the large space simulator(LSS) at ESA/ESTEC [C]//Proceedings of the 13th Space Simulation Conference, NASA CP-2340, Orlando, Florida, 8-11 October 1984.
- [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, 2007, 29(5):283-287.

射能量利用率不高的问题非常突出。高效率聚光镜的研制就是为了解决这一问题。最近的研究表明,用无穷多个二次曲线椭圆方程替代单一的二次曲线椭圆方程,人为地控制曲线上近轴及远轴点的倍率及曲线走向,在给定聚光镜光线汇聚角情况下,可以形成我们所期望的高效率聚光镜。但这种聚光镜的加工工艺难度较大,较通常椭球面加工给出的坐标数据量要大许多才能得到满意的效果,因此,有必要进一步研究更合适的设计方法。另外,随着空间载荷体积的不断增大,也要求太阳模拟器能提供更大的辐照面积,而大辐照面积的太阳模拟器必须采用离轴反射系统,即必须采用大尺寸的准直反射镜。这些需求给光学系统设计带来了一系列问题。

在离轴准直太阳模拟器中,准直反射镜面型通常为球面和非球面两种,其中球面反射镜由于存在球差而影响辐照面各处准直角的一致性和体均匀性,借助球面镜离焦和在子午面内相对于焦点的转动可对此加以补偿。对于具有较大离轴角且选用了球面准直反射镜的光学系统,必须要考虑离轴准直系统情况下的有效辐照面面形椭圆化问题。非球面中的抛物面可作为准直反射镜的面形,抛物面反射镜可消除球差对准直光束的影响,故能很好地解决采用球面反射镜所带来的离轴准直系统辐照面面形椭圆化问题。但非球面反射镜的制作工艺难度很大,不易获得大尺寸的反射镜,且制作费用很高。通过光学积分器场镜组各元素透镜口径形状的反椭圆化可以补偿这种辐照面形状的椭圆畸变,但这需要现代化数控光学加工设备,而且更大尺寸的准直反射镜必须采用拼接形式,这给机械装调带来很大困难。

不难看出,太阳模拟器的设计和研制,仍有许多关键技术需要进一步研究和探索。

- LI G, ZHOU Y P. Design of solar simulator and earth simulator for satellite attitude simulation[J]. *Infrared Technol.*, 2007, 29(5):283-287. (in Chinese)
- [4] 杨林华, 范宁, 史瑞良. KM6 太阳模拟器拼接式准直镜的装校技术[J]. *航天器环境工程*, 2005, 22(6):342-346.
YANG L H, FAN N, SHI R L. Adjustment method for collimating mirror of KM6 SOLAR simulator[J]. *Spacecraft Environment Eng.*, 2005, 22(6):342-346. (in Chinese)
- [5] 向艳红, 张容, 黄本诚. KFTA 太阳模拟器灯单元的方案设计[J]. *航天器环境工程*, 2005, 22(2):120-123.
XIANG Y H, ZHANG R, HUANG B C. Design of lamp module of KFTA solar simulator[J]. *Spacecraft Environment Eng.*, 2005, 22(2):120-123. (in Chinese)
- [6] 王元, 张林华. 一种新型全光谱太阳模拟器设计[J]. *太阳能学报*, 2006, 27(11):1133-1136.
WANG Y, ZHANG L H. Design of a new type of full-spectrum solar simulator[J]. *Acat Energiae Solaris Sinica*, 2006, 27(11):1133-1136. (in Chinese)
- [7] 张以谟. *应用光学*[M]. 北京:电子工业出版社, 2008.
ZHANG Y M. *Application Optics*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)

作者简介:刘洪波(1956—),男,吉林长春人,研究员,硕士,主要从事太阳模拟技术方面的研究。

E-mail:hbliu120@sina.com

高雁(1982—),男,吉林长春人,研究实习员,硕士,主要从事太阳模拟技术方面的研究。ynogg@163.com

《光学精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址:http://www.eope.net

定价:50.00 元/册