

太阳模拟技术

刘洪波

(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: 介绍了太阳模拟技术研究中要遵循的设计准则及基本概念。给出了相应的计算公式。对太阳模拟技术中应用的光学系统形式及其基本原理进行了阐述。较详细的对聚光系统的优化设计, 提高系统聚光效率进行了论述。分析了光学积分器对系统辐照不均匀度的影响, 给出了两种积分器形式及相应的计算公式。

关键词: 太阳模拟技术; 太阳模拟器; 均匀照明

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A

1 引言

太阳模拟技术是研究模拟太阳光辐照特性的一门技术。其中包括不同大气质量条件下的太阳光谱特性, 太阳光总辐照度, 太阳光准直角, 辐照不均匀度, 辐照不稳定度等。

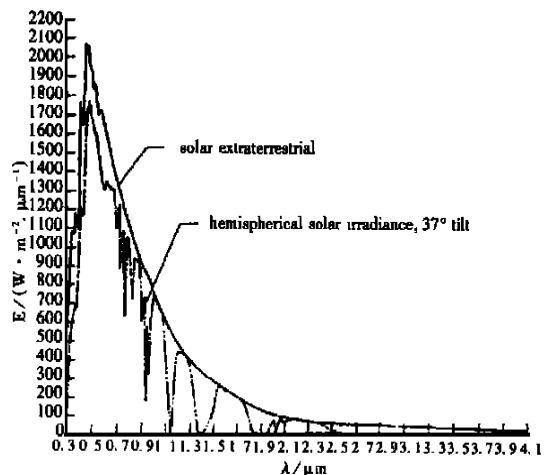
太阳模拟技术的应用领域非常广泛。应用太阳模拟技术研制的大型太阳模拟器是航天技术中卫星空间环境模拟的主要组成部分。(完成卫星的热平衡试验, 检验卫星的热设计)。研制的中小型太阳模拟器用于卫星姿态控制的太阳敏感器地面模拟试验与标定及地球资源卫星多光谱扫描仪太阳光谱辐照响应的地面定标。在太阳光伏科学与工程中, 这种类型的太阳模拟器又可用于太阳能电池的检测与标定、遥感技术中室内模拟太阳光谱辐照以及农业科学中研究植物发育和培育良种、建材行业中材料的耐辐照老化试验等。特别是近年来随着适合于人体健康保健用太阳光装置的研制成功, 进一步推动了太阳模拟技术的研究工作。

2 太阳模拟技术的设计准则

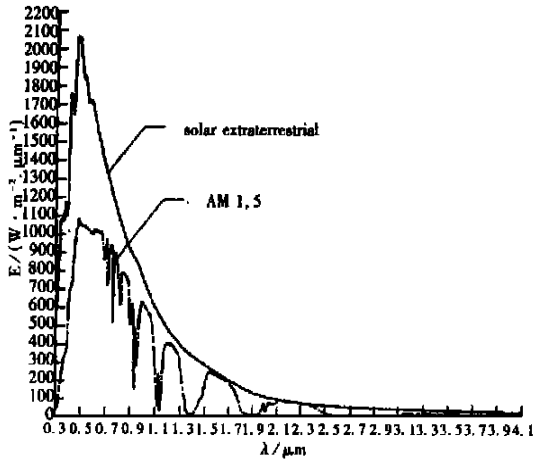
2.1 太阳光谱总辐射

太阳光谱总辐射分为AM 0 标准太阳光谱总辐射和AM 1.5 标准太阳光谱总辐射。大气质量

(AM) 指实际观察者与太阳之间路径中的空气质量与假设该观察者位于海平面上, (在标准大气压下), 太阳正位于头顶时可能存在的空气质量之比。AM 0 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 $135.3 \text{ mW/cm}^2 \pm 2.1 \text{ mW/cm}^2$ 。AM 1.5 地面不同接收条件下太阳辐照度分为法向直接日射辐照度和半球向日辐照度。法向直接日射辐照度值与用视场角为 5.8° 的直接日射表测得的数值相同^[1-2]。AM 0 和AM 1.5 地面两种不同接收条件下的辐照度曲线如图 1 所示。



(a) Plot of hemispherical solar irradiance



(b) Plot of direct normal irradiance

Fig 1 Irradiance curve of AMO and AM 1.5 at the ground at different receiving condition: (a) Plot of hemispherical solar irradiance, (b) Plot of direct normal irradiance

2.2 太阳光准直角

在日地平均距离处, 太阳的日轮视角为 $32'$ 。

2.3 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:

$$\Delta E / \bar{E} = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%$$

式中: $\Delta E / \bar{E}$ 辐照不均匀度;

E_{\max} —— 辐照面上(或体积内)的辐照度最大值;

E_{\min} —— 辐照面上(或体积内)的辐照度最小值;

\bar{E} 平均辐照度。

2.4 辐照不稳定性

辐照不稳定性表征辐照度随时间的变化。由下式决定:

$$\Delta E / \bar{E} / T = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% / T$$

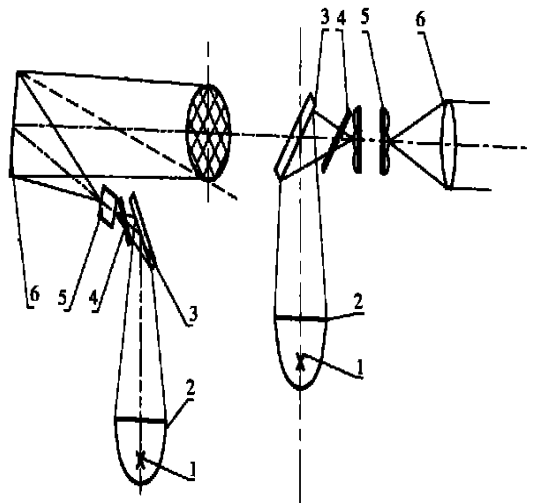
式中: $\Delta E / \bar{E} / T$ —— T 时间内的辐照不稳定性。实际上的太阳辐射在数日内是稳定的, 年变化量 $\pm 3.4\%$ 。

3 光学系统形式及其基本原理

太阳模拟技术所涉及到的光学系统是一种复杂的照明系统。在光学设计中, 并不是把消除系统像差, 提高成像质量作为主要的研究对象。而是把注意力集中在如下两点。其一是选择合理的光学系统, 优化光学设计参数, 尽可能地提高试验空间

的辐照不均匀度。其二是尽量提高太阳模拟器光源辐射能量的利用率。因此, 对太阳模拟器光学系统设计及其评价方法与通常我们熟知的光学系统相比另有特点^[3]。设计中应给予足够的重视。

按光学系统结构特点可分为两大系统, 同轴系统和离轴系统。图 2 是典型的两种光学系统结构示意图。同轴光学系统的特点是均匀辐照体积或均匀辐照面积的对称轴与光学系统光轴重合。多用于小型太阳模拟器中。现代大型太阳模拟器多采用离轴准直光学系统。可获得的辐照体不均匀度 $< \pm 5\%$ 。由于试验体积的对称轴同光学积分器光轴有一定夹角, 可以消除被辐照体表面二次和多次反射带来的辐照度误差^[5]。



1. light source; 2. ellipsoidal collector; 3. folding mirror; 4. filter; 5. optical integrator; 6. collimated lens

Fig 2 Optical system of solar simulator

如图 2 所示。太阳模拟器的光学系统通常由光源、聚光系统、光学积分器、准直系统、太阳光谱辐照度分布匹配滤光片组成。采用具有轴对称性的短弧氙灯做为模拟器的理想光源。光源发出的辐射通量由聚光镜系统会聚并反射。在光学积分器场镜组阵列通光口径内形成一个所要求的辐照分布。这个分布经光学积分器各元素透镜对称分割, 在叠加透镜(图中未示出)的焦面上形成一个辐照度均匀分布的辐照面。这个均匀辐照面经准直透镜投影成像在要求的位置上。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 AM0 或 AM 1.5 标准太阳光谱辐照分布在规定的精度级别内相匹配。

4 聚光系统

太阳模拟器是强聚光系统。考虑到所采用氙灯的发光特性, 通常太阳模拟器的聚光系统采用包容角很大的反射式聚光系统。椭球面可以获得较高利用率的聚光效果^[4]。如图 3 所示。采用图中坐标系, 椭圆方程表示为:

$$y^2 = 2Rx - (1 - e^2)x^2$$

式中 R 是曲线顶点曲率半径, $R = \frac{2ff'}{f + f'}$; e 是椭圆离心率, $e = \frac{f' - f}{f + f'}$ 。 F 和 F' 分别为椭球面聚光镜的第一, 第二焦点。在椭球面反射式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。

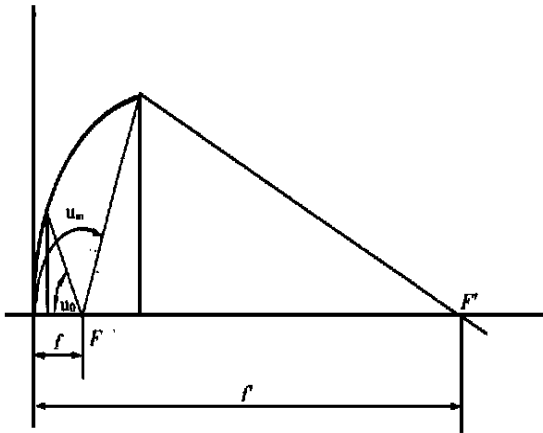


Fig 3 Optical parameters of ellipsoidal collector

聚光镜不同环带对于第一、二两个焦面的成像倍率不同, 是 u 角的函数, 即:

$$M u = \frac{e^2 + 2e \cos u + 1}{e^2 - 1}$$

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。

聚光镜汇聚到第二焦面上的辐射通量占氙弧发出的全部辐射通量的比率 K_c 称为聚光镜的聚光效率。 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。表示为:

$$K_c = \frac{2\pi \int_0^{u_0} t(u) \sin(u) du}{2\pi \int_0^{180^\circ} t(u) \sin(u) du}$$

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的辐射通量

的比率称之为该口径的辐射通量利用率 K_i 。很显然 K_i 取决于第二焦面上的辐射通量的相对分布。因此, 我们可以这样说, 聚光镜第二焦面内的辐照度分布决定了被照面内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。利用椭球面反射聚光镜做太模的聚光镜, 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。有的时候还要以牺牲平均辐照度为代价。

改进的椭球面反射式聚光镜能够提高椭球镜的聚光效率和第二焦面上的辐照分布^[5]。若将聚光镜划分为若干个环带, 再相对于每个环带在第二焦面的给定口径内选取若干个位置不同的瞄准点。每个环带所选取的面形使得氙弧峰值亮度点经此环带投射到给定口径内的瞄准点上。这种方法经分析, 实际上给定口径内瞄准点位置不同, 相当于单一椭球面情况下氙弧峰值亮度点离焦量不同。且各环带间面形不连续。

在已选定的椭球面方程式:

$$y^2 = ax + bx^2$$

中加入 x 的其它幂次项, 使方程变为高次方程:

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

式中, x 低幂次系数大, 高幂次系数小。故在近轴范围内 x 的低次项对面形起主导作用, 与原椭球面偏离很小。随着 x 的增加, 高次项对面形影响增大, 在远轴范围内 x 的高次项修正原椭球面面形。实践证明, 这种方法保证了聚光镜整个面形的连续性。可增加聚光镜的聚光效率并改进其第二焦面内的辐照分布。

5 光学积分器^[6]

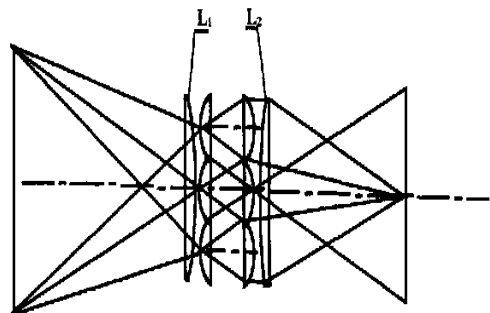


Fig 4 Principle optical integrator
与一般的照明系统不同, 太阳模拟器的光学

系统无法采用被照面和聚光系统出瞳重合或共轭的均匀照明形式。太阳模拟器的光源多采用氙灯,氙灯和椭球聚光镜组成了聚光系统。由于氙灯电极遮拦,不同方向上的亮度分布不一致,在光路的任意位置,都找不到较均匀的辐照面。为保证太阳模拟器辐照面均匀,通常在系统中采用一种组合光学元件——光学积分器。如图 4 所示。它由两组前后排列的透镜阵列组成。前组透镜位于聚光镜第二焦面处,既起到场镜作用又把聚光镜出瞳

成像到对应的后排透镜上,避免了光能损失。后组透镜把对应的前组透镜成像并重叠到被照面同一位置。因为场镜组将聚光镜第二焦面上的辐照度分布对称分割,显然每个透镜上的均匀性显著地好于整个第二焦面上的均匀性。当所有透镜的像叠加后,均匀性误差能相互补偿。故在重叠像面位置处均匀性最好。图中 L_1 是场镜准直镜, L_2 是叠加透镜。

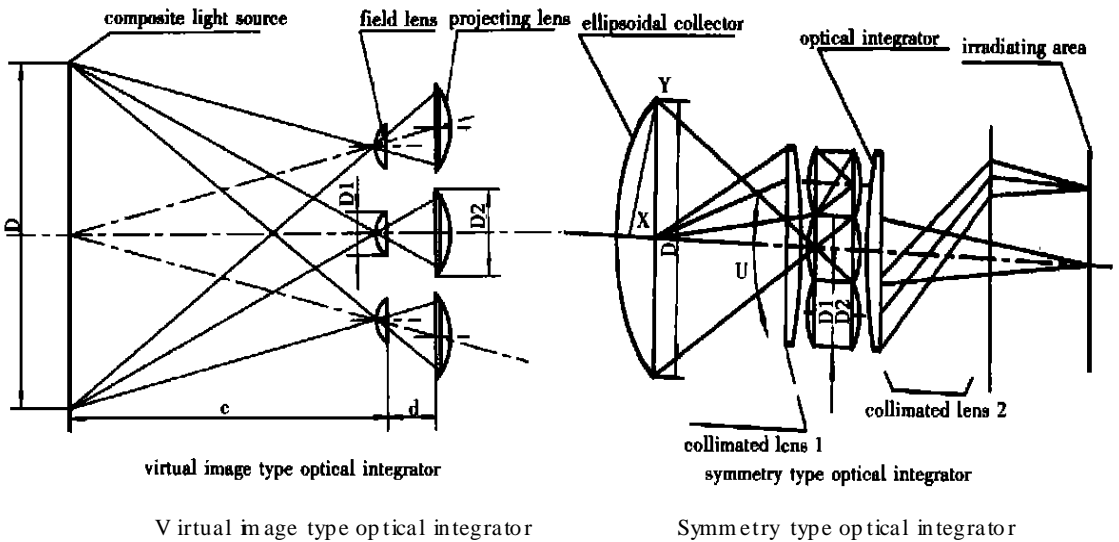


Fig. 5 Optical integrator

按其结构特点光学积分器分两种形式:对称式,虚像式。如图 5 所示。对称式积分器由场镜组和投影镜组构成。聚光镜出瞳位于场镜准直镜 1 的焦面上,而每个场镜元素透镜的焦面都是出瞳像的位置。投影镜组相应的光学通道的元素透镜置于该位置上,投影镜和准直镜 2 将其对应的场镜元素的像重叠在准直镜 2 的焦面上,利用准直镜实现了光瞳重合。系统的计算公式如下:

f_2 ——聚光镜第二焦距;
 $X、Y$ ——聚光镜光瞳坐标。
 虚像式光学积分器的重叠像在聚光镜出瞳,由于对应透镜中心连续交于聚光镜出瞳中心,实现了像的重叠,光瞳重合。系统计算公式如下:

$$D_1 = D_2$$

$$Y = \frac{1}{2}D$$

$$f_2 - X = D/2 \times \tan u$$

$$f_2 = M_0 f_1$$

$$Y^2 = 2RX - (1 - e^2)$$

$$D = D_1 \quad \beta_1 = - \frac{d}{c}$$

$$d = \frac{C}{\beta_2 - 1} \quad f_1 = \frac{c\beta_1}{\beta_1 - 1}$$

$$\beta_2 = \frac{D}{D_1} \quad D_2 = - \mathcal{P}\beta_1$$

$$f_2 = \frac{d\beta_2}{\beta_2 - 1}$$

式中: D ——聚光镜出瞳直径;
 U ——孔径角;
 M_0 ——聚光镜正轴倍率;
 f_1 ——聚光镜第一焦距;

应当指出,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。

参考文献:

- [1] ASTM E891-87, Standard table for terrestrial direct normal solar spectral irradiance for air mass 1.5[S].
- [2] ASTM E892-87, Standard table for terrestrial solar spectral irradiance air mass 1.5 for a 37° tilted surface[S].
- [3] 仲跻功, 等. 太阳模拟器光学系统[A]. 陈星旦. 庆祝王大珩教授从事科研活动五十五周年学术论文集[C]. 长春: 吉林科学出版社, 1992. 332- 340.
- [4] 柯受全. 卫星环境工程和模拟试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1998.
- [5] 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(3): 187- 193.
- [6] 杜温锡. 均匀照明和照度分布计算[J]. 光学机械, 1978, (4): 1- 4.

Solar simulation technology

LU Hong-bo

*(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)*

Abstract: The paper presents the design reference and the basic concepts for studying solar simulation technology, and also gives formulas concerned. An optical system structure and basic principles in solar simulation technology, collector optimization design and increasing system collective efficiency are discussed, respectively in detail. The effect of the optical integrator on the system irradiance nonuniformity is analysed, and the two optical integrator structures and the relative calculating formulas are given.

Key words: solar simulation technology; solar simulators; homogeneous illumination

作者简介: 刘洪波(1956-), 男, 吉林省长春市人, 副研究员, 硕士。