弧光灯热流标定系统光源的仿真设计

朱新新[1] 王 辉[1] 刘洪波[2] 杨庆涛[1] 杨 凯[1]
[1]中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力学研究所, 四川 绵阳 621000
[2]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 为改进现有弧光灯热流标定系统的光源装置,有必要对其进行仿真研究。以等亮度曲线分布为依据设计了氙灯模型,计算了氙灯发光功率的分布,借助角度切趾文件模拟了氙灯发光角度分布,然后建立了整个标定光源装置的仿真模型,计算了积分器出口处的辐照度。与实验数据比较,4种积分器出口平均辐照度实验值相对仿真值损失了约49%,且这种损失随着积分器口径增大而增大。经分析验证,仿真值损失的主要原因是实验所用椭球镜聚焦率比设计值衰减了约40%,损失会随着积分器口径增大的主要原因是所建氙灯模型较好地模拟了氙灯发光功率密度由阴极到阳极递减这一特征。

关键词 光学设计; 短弧氙灯光源; 亮度曲线; 辐照度; 热流标定
中图分类号 V416.5 **文献标识码** A
doi: 10.3788/AOS201636.0422003

Simulation Design of the Arc Lamp System for Heat Flux Sensor Calibration

Zhu Xinxin[1] Wang Hui[1] Liu Hongbo[2] Yang Qingtao[1] Yang Kai[1]
[1]*Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan* 621000, *China*
[2]*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*

Abstract To improve on the lamp source set of the system for the heat flux sensor calibration, the simulation study is implemented in the paper. Based on the luminance distribution, the composition of xenon short arc lamp is designed and its power distribution is calculated. The angle distribution is simulated by angular apodization files. Then the model of the lamp source set is built and the radiation on the exit of the integrator is calculated. Compared with the test result, the average radiation on the exit of the integrator in test deduces about 49% and the loss of radiation increases with the increasement of the caliber of the integrator. By theoretical analyzing and experimental verifying, the loss of radiation is because the collection efficiency of the ellipsoidal specular reflector falls by 40% in test. And the reason why the loss increases with caliber of integrator is that the xenon short arc lamp model in this paper reflects well the feature that the density of the power of xenon short arc lamp descends from the cathode to the anode.

Key words optical design; xenon short arc lamp source; curve of luminance; radiation; heat flux calibration
OCIS codes 220.3620; 230.1150; 120.4570; 120.4820; 200.4560

1 引 言

在高超声速气动热与热防护实验中,热流密度是极其重要的测试参数[1]。为提高热流密度测量精度,必须对所用的热流传感器进行标定[2]。中国空气动力研究与发展中心研制了一套国内仅有的包括中低热流标

收稿日期: 2015-10-14; **收到修改稿日期**: 2015-11-18
作者简介: 朱新新(1988—),男,硕士,研究实习员,主要从事气动热防护与热流测试方面的研究。
E-mail: xinxincomplex@126.com

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定环节以及高热流标定环节(弧光灯热流标定系统)的完整高精度可溯源热流传感器标定系统，目前该系统已成功应用于航空航天部门的热流传感器标定。但现行弧光灯标定光源装置还无法满足部分较大感应面和较高热流(大于10 MW/m^2)传感器的标定需求，为了建设更大辐照面和更高热流密度的标定光源装置，需要建立整个光源装置的仿真模型，进行光学模拟设计，探明设备运行机理细节。

弧光灯热流标定系统的光源装置借鉴了太阳模拟器[3-4]的思想，由氙灯、椭球镜和积分器等部件构成。对弧光灯热流标定光源装置仿真建模时，积分器和椭球镜的模拟相对容易实现，氙灯光源的建模是难点。国外学者进行光学设计时很重视光源装置的仿真，但对于氙灯建模过程并没有给出具体技术细节[5-8]；国内部分学者借用发光功率与发光体积分布正相关的思想[9]来模拟发光区域，这种方式的不足是发光功率密度一样，呈均匀分布。还有部分学者注意到氙灯发光功率密度最高的是在阴极点附近[10]，简单把发光区域分为核心区与非核心区，没有详细考虑发光功率密度的分布。本文以氙灯亮度曲线作为确定发光功率分布的依据，对氙灯光源准确建模，并利用蒙特卡罗光线追迹方法对整个标定光源装置进行仿真计算和修正，通过与实验数据比对，说明了建模方法的合理性和准确性。

2　氙灯模型的建立

氙灯模型对于整个标定光源装置建模十分重要，为了更好地模拟出氙灯发光的实际效果，从氙灯模型构成、氙灯发光功率分布以及氙灯发光角度三方面进行模拟。氙灯的发光谱对所建模型的积分器出口辐射强度和均匀性并无影响，可不予考虑。

2.1　氙灯模型构成

氙灯主要结构如图1(a)所示，其阳极和阴极(尖端)分别密封接于石英泡壳的两端，泡壳内抽真空后充入一定压力的纯氙气，其放电的原理是氙气受高压激发形成等离子体辐射。图1(b)是厂家提供的氙灯等亮度分布曲线[11]，距离阴极点0.07L_{arc}(L_{arc}是极间距，这里为10 mm)处最亮，称为阴极斑。离阴极斑越近亮度越高，远离阴极斑亮度迅速衰减，沿阴阳极轴向衰减较快，径向衰减较慢。

根据上述特征，将整个发光区域分为3个子区域，每个子区域分别用1个子光源模型来模拟。子光源模型的线性尺度取该发光区域中点附近，并结合图1中等亮度曲线分布情况得到如图2所示的模拟光源布局

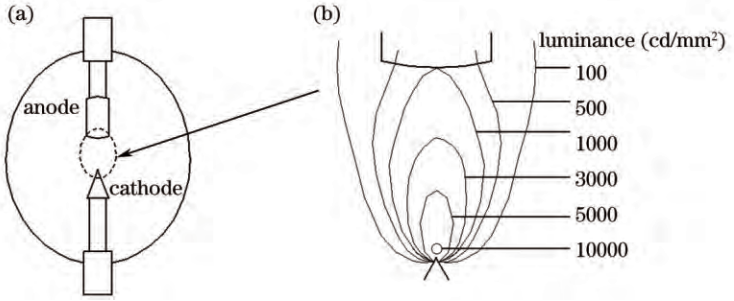

图1　短弧氙灯(a)结构和(b)亮度

Fig.1　(a) Structure and (b) luminance of xenon short arc lamp

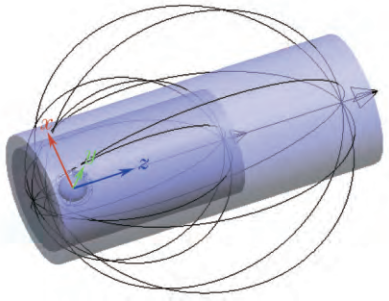

图2　氙灯模型

Fig.2　Model of xenon short arc lamp

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

和几何尺寸，从里到外依次是球形光源(半径0.25 mm)、小圆柱光源(底面半径1 mm，高3.5 mm)和大圆柱光源(底面半径1.25 mm，高6 mm)。球形光源圆心位于距离阴极$0.07L_{arc}$处，用于模拟阴极斑；小圆柱光源中心线与阴阳极轴线重合，底面圆心与阴极点重合，用于模拟发光核心区；大圆柱光源中心线也与阴阳极轴线重合，底面圆心与阴极点重合，用于模拟非核心区。这组光源的布局和位置是固定的，具体每个光源的尺寸大小是结合后面仿真得到的一个较优组合，并不唯一，可适当微调。

2.2 氙灯发光功率分布的计算

氙灯发光功率分布采用以下方法确定。首先需得到氙灯亮度相对强度分布曲线，以阴极为原点，阴极与阳极的中轴线为x轴，氙灯轴向亮度的相对强度为y轴，拟合亮度相对强度曲线。如图3所示，根据图1中亮度分布取了7个采样点，并设阴极斑的亮度为1，将其转化为亮度相对强度，然后用幂函数进行拟合得到轴向上亮度相对强度分布曲线，曲线方程为

$$y = 1.73859(1+x)^{-1.00876}\ , \tag{1}$$

式中$0.7 \leqslant x \leqslant 10$，残差平方和为0.00739，拟合效果较好。

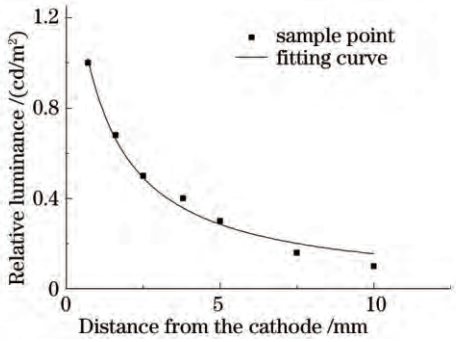

图3 亮度相对强度曲线

Fig.3 Curve of luminance relative intensity

先不考虑发光角度，假设每个子光源模型的发光点都集中在模型的面上，呈均匀分布，则整个表面每一点的亮度相等、发光功率相等，可设该表面的亮度与发光功率的面密度呈正比例关系。则从内到外各个模拟子光源模型的发光功率面密度L_1、L_2、L_3可定义为

$$L_1 = 1 \times k\ , \tag{2}$$

$$L_2 = \frac{1}{b} \times \int_a^b 1.73859(1+x)^{-1.00876} \times k\ , \tag{3}$$

$$L_3 = \frac{1}{10} \times \int_b^{10} 1.73859(1+x)^{-1.00876} \times k\ , \tag{4}$$

式中$0.7 < a < b < 10$，表示距离阴极点的距离；$k > 0$，是表面亮度与发光功率面密度的一个比例系数，单位是W/cd。这时，若已知氙灯某状态的电功率为P，则模拟子光源的发光功率P_i的值为

$$P_i = P \times \eta \times \frac{L_i \times A_i}{\sum_{i=1}^{n}(L_i \times A_i)}\ , \tag{5}$$

式中A_i为对应的模拟子光源模型的表面积，$i = 1,2,\cdots,n$，所建模型中n为3，η为氙灯光电转换效率，一般取45%[11]。

对于(2)~(4)式作如下说明：模型用3个光源替代一个连续的发光体。在$0.07L_{arc}$~10的轴线方向上，3个子光源对应的亮度曲线叠加后的效果应该与图3中的曲线相近，要想直接获取满足这一条件的3条亮度曲线十分困难，故采用以下近似方法：按3个子光源的物理布局，将图3中的亮度曲线分为3段，分别对应3个子模型。第一段从$0.07L_{arc}$到a，对应阴极斑，这一段亮度完全由阴极斑提供，其平均亮度值为最大值(1 cd/m²)，如(2)式所示；第二段从a到b，对应核心区，其亮度大部分由核心区提供，还有少部分由阴极斑提供，单求核心区对应子光源平均亮度值时应适当减小，故可用区间0~b长度做分母而不是($b-a$)，如(3)式所示；第三段从b

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

到10，对应非核心区，其亮度由阴极斑、核心区以及非核心区共同提供，单求非核心区对应子光源平均亮度值时也应减小，故可用区间0~10的长度作分母而不是(10−b)，如(4)式所示。按这种方法划分区间后，a的取值一般为$0.07L_{arc}+d_1$，b的取值范围为d_2~$2\times d_2$，具体取值大小可通过二分插值法，不断代入(5)式，以整个氙灯模型大约70%的功率集中在阴极斑和核心区为参考准则。其中d_1是模拟阴极斑模型的轴向区间长度，d_2是模拟核心区模型的轴向区间长度，对于图2中的模型来说，d_1就是球形子光源的直径，d_2就是小圆柱的高。按上述模型，当a取1.2，b取6.3时，得到L_1:L_2:L_3 = 1:0.320:0.068，P_1:P_2:P_3 = 1:11.5:5，此时阴极斑模型与核心区模型所占整个氙灯模型的能量比为71.43%。

2.3 发光角度的模拟

各模拟子光源的光线出射基本形式为垂直表面，其具体发光角度由配光曲线控制，在LightTools仿真环境里，角度切趾文件可以对配光曲线进行较好的控制。在纬度0°~360°上均匀分布，在经度27°~122°上按角度切趾文件设定的光强数据分布。图4(a)是厂家提供的配光曲线[8]，其中0°对应的是阴极方向，180°对应的是阳极方向；图4(b)是通过编写角度切趾文件在仿真模型中得到的氙灯光源模型配光曲线，与厂家提供的配光曲线十分接近，说明氙灯发光角度得到了较好的模拟。

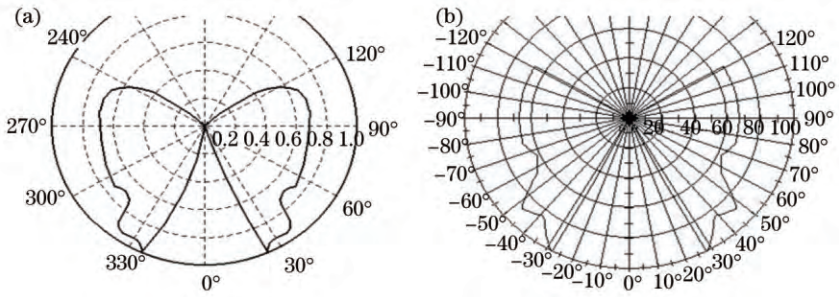

图4 配光曲线对比。(a) 厂家配光曲线；(b) 模拟的配光曲线

Fig.4 Comparison of the distribution curves of light. (a) Distribution curves of light by manufacture; (b) distribution curves of light by simulation

3 构建标定光源装置仿真模型

至此，确立了氙灯光源的模型构成，计算出了各子模型的发光功率比值、并较好地模拟了发光角度分布。下面将基于LightTools软件，把第2节所建氙灯模型置于整个弧光灯热流标定系统光源装置模型中进行仿真，并利用蒙特卡罗光线追迹的方法对辐照度进行计算分析。整体布局如图5所示，图5(a)是仿真模型截图，细线为少部分的光线显示，实际仿真时共追迹了1000万条光线；图5(b)是实物装置的侧面照，椭球镜和氙灯位于图片右侧的大黑箱里，积分器和传感器位于图片左侧的真空箱里，中间设有快门，方便光路的控制。氙灯模型位于椭球镜第一焦点处(坐标轴原点)，发出的光辐射通量经椭球聚光镜内表面反射会聚投影到椭球镜第二焦面上，具有一定会聚角的光线进入通道反射式积分器后，在内部多次反射(反射次数由光线入射角和积分器长径比决定)，使光线充分混合，从而在积分器出口获得均匀的辐照面。在椭球镜第二焦点处和积分器出口附近都放有接收器，以便对积分器前后的热流密度(辐照度)作对比分析。

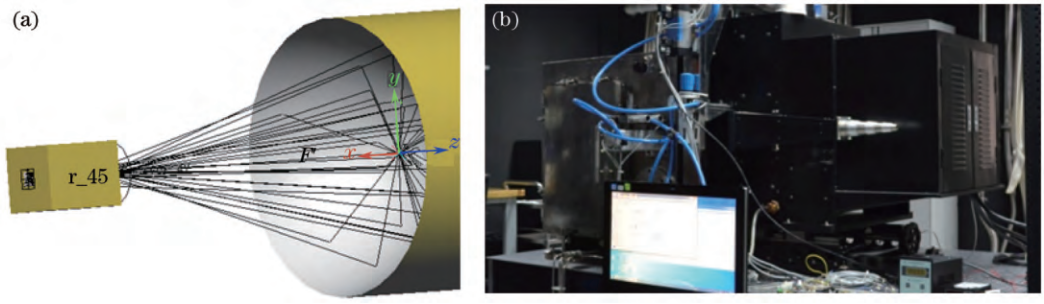

图5 光源装置仿真模型和实物照片。(a) 仿真模型；(b) 装置照片

Fig.5 Simulation model and photo of light source setup. (a) Simulation model; (b) photo of the setup

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

各元件的几何参数和光学参数与实验设备一致，具体见表1。实验中氙灯的功率稳定性较好，表现为对同一口径积分器，不同电功率与其对应状态得到的出口热流密度有较好的线性度，而对于仿真来说其功率稳定性是容易保证的，所以在进行仿真计算时只需任意选择一个电功率状态即可，本算例选择电功率为3 kW。

表1 光源装置的几何参数和光学参数表

Table 1 Geometry parameters and optical parameters of the light source setup

	Geometry parameters	Optical parameters
Xenon short arc lamp	Refer to 2.1 section	Electric power is 3 KW
Ellipsoidal specular reflector	Same with optical set in test	Adaxial magnification is 8 and the reflectivity is 86%
Integrator	4 kinds of caliber : 6 mm×6 mm、12 mm×12 mm、17 mm×17 mm、22 mm×22 mm	Reflectivity is 86%
Receiver	Same with the caliber of integrator	Size of grid is 1 mm

图6是12 mm×12 mm积分器入口和出口处得到的光斑，为更好地看到光斑边界，接收器大小均为14 mm×14 mm，可见图6(a)中高能量的不均匀聚焦光斑在通过积分器后变成了图6(b)中的均匀光斑，另外3个积分器的仿真情况类似，都与实际情况相符。

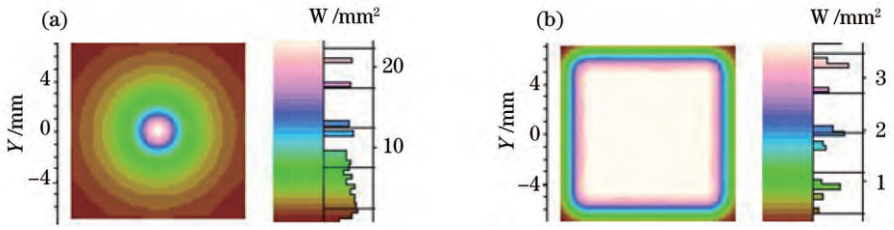

图6 积分器(a)入口和(b)出口光斑对比

Fig.6 Comparison of flare on the (a) entrance and (b) exit of the integrator

4 仿真计算与实验分析

表2是积分器出口仿真数据与实验数据的对比情况。在相同电功率(3 kW)条件下，平均辐照度的仿真值随着积分器口径的增大而减小，这一趋势与实验情况相符；但对于不同口径积分器，平均辐照度的实验值相对于仿真值都有较大损失，平均损失高达约49%；进一步比较，积分器口径越大，损失的越多。

表2 平均辐照度实验值和仿真值的比较

Table 2 Comparison of the average radiation between test and simulation

Size of integrator caliber /(mm×mm)	Electric power /kW	Average radiation in test /(MW/m²)	Average radiation in simulation /(MW/m²)	Ratios of radiation between the test and simulation /%
6×6	3	4.1	6.89	59.51
12×12	3	2.04	3.8	53.68
17×17	3	1.14	2.54	44.88
22×22	3	0.66	1.7	38.82

实验中观察到第二焦面上光斑的聚焦性不是很理想，经分析是由于椭球镜型面的加工精度不够理想(加工工艺限制)，光斑在第二焦面的放大倍数不止椭球方程中设定的8倍。

为验证这一分析，对实验聚焦率和仿真聚率进行了比较。仿真的聚焦率可用待研究区域的能量除以整个第二焦面上的能量得到。但实验聚焦率较难获得，因为整个面上的能量分布较难测到。后来基于辐照度分布的对称性，找到了一种可靠的间接比较方法。通过标准戈登计对第二焦面进行水平扫描，得到了以第二焦点为原点，水平方向±50 mm的辐照度分布，归一化后得到如图7所示的辐照度分布对比，实线为仿真值，虚线为实验测试值，可见实验所用椭球镜的聚焦效果比仿真结果差很多。鉴于目前最小的积分器口径是6 mm×6 mm，可基于数值积分定义一种近似聚焦率：

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$E' = \frac{\sum_{-3}^{3} q_i \times \Delta x}{\sum_{-50}^{50} q_i \times \Delta x} \times 100\% , \tag{6}$$

式中 Δx 为水平方向上的采样间距，约为0.3 mm，q_i为采样区间对应的辐照度。同理对仿真数据也做类似处理，然后分别对其数值积分得到 $E'_{\text{simulation}} = 67.46\%$ ，$E'_{\text{test}} = 42.65\%$ 。即从整个对称椎体状能量分布的剖切面(水平方向)来看，实验的聚焦率只有仿真的63.22%，如果考虑整个椎体状能量，这一比值还要低，即椭球镜的聚焦率衰减了约40%。正是椭球镜聚焦率大幅下降才导致4个积分器平均辐照度的实验值平均损失高达约49%。另外在实验中可以明显观察到氙灯光源的光线没有按照预想的全部进入椭球镜(仿真时基本能保证光线全部进入椭球镜)，这也会导致实验值损失一小部分。

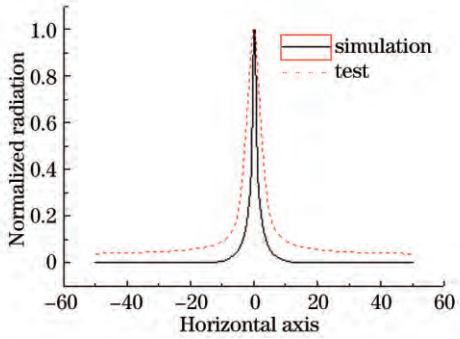

图7 归一化辐照度实验值和仿真值的分布比较

Fig.7 Comparison of normalized radiation between test and simulation

为进一步说明实验所用椭球镜的聚焦率确实比设计值下降了约40%，这里采用反演分析法继续验证。在仿真模型中将椭球镜的聚焦率变为原来设计值的60%左右，其他仿真条件不变。当把椭球镜方程近轴放大倍率由原来8倍的变为13.3倍后，用(6)式对其积分器入口的聚焦程度进行计算得 $E'_{\text{simulation2}} = 43.43\%$ 。此时仿真值和实验值的比较如表3所示，当仿真所用椭球镜聚焦率(43.34%)和实验椭球镜的聚焦率(42.65%)相近时，积分器出口辐照度的实验值和平均值也很接近，综合4个积分器来看，平均损失约为14%。考虑到实际实验时光线难以像仿真模型中那样完全进入反射镜，以及两个相近聚焦率的椭球镜型面不同等因素的影响，用该结果与表2的结果比对就不难看出，平均辐照度损失的主要原因是椭球镜聚焦率下降，从而进一步表明所建氙灯模型和整个标定光源装置仿真模型是正确可信的。

表3 改变放大倍率后平均辐照度实验值和仿真值的比较

Table 3 Comparison of the average radiation between test and simulation after changing the adaxial magnification

Size of integrator caliber /(mm×mm)	Electric power /kW	Average radiation in test /(MW/m^2)	Average radiation in simulation /(MW/m^2)	Ratios of radiation between the test and simulation /%
6×6	3	4.1	4.41	92.97
12×12	3	2.04	2.26	90.27
17×17	3	1.14	1.32	86.36
22×22	3	0.66	0.89	74.16

表2和表3的最后一列都表明对于不同口径积分器，平均辐照度的实验值相对于仿真值的损失会随着口径增大而增多，这主要是由所采用的氙灯建模方法决定的。若按以往方法将氙灯建成均匀发光的模型，由于实验椭球镜的聚焦率低于仿真设计值，同样会造成辐照度实验值损失，但不同口径的积分器损失幅度将一样。而以氙灯亮度分布为依据的氙灯建模方法，较为准确地模拟了氙灯发光功率密度由阴极斑到阳极的递减过程，且氙灯阴极斑位于椭球镜焦点处，这样在积分器入口处放大光斑的功率密度由中心向四周单调降低，就会出现辐照度实验值相对于仿真值的损失随着积分器口径增大而增大的现象。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5 结 论

通过上述仿真结果和实验数据的对比分析，得到以下结论：1) 以氙灯亮度分布曲线为依据建立的氙灯模型和整个弧光灯热流标定光源装置模型正确可信；2) 实验所用椭球镜的聚焦率比设计值衰减了约40%，下一步的设备建设需重点改进椭球镜加工工艺；3) 由于氙灯发光功率密度由阴极到阳极的递减，由实验椭球镜聚焦率衰减导致的辐照度损失会随着积分器口径增大而增大，在进行实验目标值可行性论证和相关元器件设计时需参考表2进行适当修正。目前该仿真模型已得到初步应用，借助该仿真模型设计了特殊的氟化钙聚焦透镜和水冷光阑，聚焦透镜用于提高积分器出口的热流密度，水冷光阑用于获取更稳定的低状态热流密度。

参 考 文 献

1 Zhang Zhicheng, Pan Hailin, Liu Chuping, *et al*.. Hypersonic aerothermodynamics and thermal protection[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 4-11.
张志成, 潘海林, 刘初平, 等. 高超声速气动热与热防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 4-11.

2 Liu Chuping, Yang Qingtao, Wang Hui, *et al*.. Heat flux measurement in aerothermodynamics and thermal protection test[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 194-196.
刘初平, 杨庆涛, 王 辉, 等. 气动热与热防护实验热流测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 194-196.

3 Lü Tao, Zhang Jingxu, Fu Donghui, *et al*.. A deformed ellipsoid condenser beneficial to the uniformity of the solar simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1223001.
吕 涛, 张景旭, 付东辉, 等. 可提高太阳模拟器均匀性的变形椭球面聚光镜[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1223001.

4 Gao Yue, Zhang Guoyu, Zheng Ru, *et al*.. Solar simulator irradiation uniformity based on optical integrator[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0323003.
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): 0323003.

5 C T Kidd. High heat flux measurements and experimental calibrations/characterizations[C]. NASA Langley Measurement Technology Conference, 1992, N93-13663: 1-20.

6 Tamarack Scientific Company. Transient calorimeter calibration system[R]. Orange: Technical report AFFDL-TR-75-24, 1974.

7 Ulmer S, Reinalter W, Heller P, *et al*.. Beam characterization and improvement with a flux mapping system for dish concentrators[J]. J Solar Energy Eng, 2002, 124(2): 182-188.

8 Petrasch J, Coray P, Meier A, *et al*.. A novel 50 kW 11000 suns high-flux solar simulator based on an array of xenon arc lamps[J]. J Solar Energy Eng, 2007, 129(4): 405-411.

9 Xiang Yanhong, Zhang Rong, Huang Bencheng. Irradiation uniformity simulation of KFTA solar simulator[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(5): 288-292.
向艳红, 张 容, 黄本诚. KFTA太阳模拟器辐照均匀性仿真[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(5): 288-292.

10 Liu Shi. Study on key technique of collimation solar simulator with high-precision[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 63-65.
刘 石. 高精度准直式太阳模拟器及其关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 63-65.

11 Jiang Yongping, Xu Qinyu. High pressure xenon short arc lamps and its application[J]. Advanced Motion Picture Technology, 2007, (4): 30-37.
蒋永平, 徐琴玉. 高压短弧氙灯及其使用[J]. 现代电影技术, 2007, (4): 30-37.

栏目编辑： 韩 峰

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net