

# 弧光灯热流标定系统的光学设计

朱新新 王 辉 杨庆涛 杨 凯 陈 卫

中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000

**摘要** 以提高弧光灯热流标定系统积分器出口的热流密度为目标,给出了新系统的设计方法。首先介绍了系统的原理和设计目标,其次对氙灯的选择和定位进行了分析,然后根据氙灯、椭球镜以及积分器三者间的制约关系,对椭球镜和积分器的相关参数进行了设计和优化。最后,得到了一个各项指标较优的标定系统。在不均匀度小于3%的前提下,新系统积分器出口的热流密度平均提高了33%。另外,椭球镜的截面直径和深度分别减小了约16%和18%,在同水平工艺条件下,这一结果可使椭球镜镜面的加工精度更高。

**关键词** 光学设计; 氙灯光源; 旋转椭球镜; 反射式积分器; 热流标定

**中图分类号** V416.5 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1122001

## Optical Design of Arc Lamp Heat Flux Calibration System

Zhu Xinxin Wang Hui Yang Qingtao Yang Kai Chen Wei

*Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center,  
Mianyang, Sichuan 621000, China*

**Abstract** To improve heat flux density at the exit of the integrator of arc lamp heat flux calibration system, an approach is proposed. Firstly, the principles and design objectives of the system are briefly introduced. Secondly, the selection and location of xenon arc lamp are analyzed. Thirdly, according to the restriction relationship among the lamp, the ellipsoidal specular and the integrator, relevant parameters of the ellipsoidal specular and the integrator are designed and optimized. Finally, a new calibration system with all optimum indicators is obtained. In the new calibration system, the heat flux density at the exit of integrator increases by 33% when unevenness is less than 3%. The truncation diameter and the depth of the ellipsoidal specular decrease by 16% and 18% respectively. Under the same process conditions, the results can lead to a higher process accuracy of ellipsoidal specular.

**Key words** optical design; xenon arc lamp source; rotating ellipsoidal specular; reflection type integrator; heat flux calibration

**OCIS codes** 220.3620; 230.1150; 120.4570; 120.4820; 200.4560

## 1 引 言

表面热流是气动热与热防护实验中非常重要的实验数据,其数据的精度与准度直接影响到航天飞行器和导弹武器等研制的精度和射程<sup>[1]</sup>,要求直接参与测试的热流传感器具有较高的测量精度和准度水平。因此,必须对参与测试的热流传感器进行标定,只有通过标定才能确定热流传感器的响应特性和转换系数,从而为提高气动热与热防护实验热流测量准确性与可靠性提供技术支撑<sup>[2]</sup>。中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所初步建成了较为完善的、覆盖低中高热流密度的热流标定系统,且已投入使用。该标定系统的高热流标定环节为弧光灯热流标定系统<sup>[3]</sup>。弧光灯热流标定系统的光学元件可分为两部分,第一部分是借鉴了太阳模拟器<sup>[4-6]</sup>设计的聚光系统,其核心元件是椭球镜<sup>[6]</sup>;第二部分是匀光系统,其主要元件是光学积分器<sup>[7]</sup>。目前,使用较多的光学积分器有通道反射式光学积分器<sup>[7]</sup>和透镜式光学积分器<sup>[8]</sup>,鉴于热流传感器标定系统所要求的小辐照面、高密度和高均匀性等特点,中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所建成的高热流标定系统选用的是通道反射式光学积分器。本文以提高积分器出口热流密度水平为目

**收稿日期:** 2016-05-03; **收到修改稿日期:** 2016-06-07

**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等方面的研究。

E-mail: xinxincomplex@126.com

标,基于光学仿真对弧光灯热流标定系统进行分析和优化设计。

## 2 系统原理与设计目标

弧光灯热流标定系统的光学元件布局如图 1 所示,整个系统由短弧氙灯<sup>[9]</sup>、旋转椭球镜和通道反射式积分器组成。其中, $F_1$  为椭球镜的第一焦点,对应的短焦距为  $f_1$ ;  $F_2$  为椭球镜的第二焦点,对应的长焦距为  $f_2$ ; 椭球镜的深度为  $H$ ,口径为  $D$ ;  $a$  为椭球镜的长半轴,  $c$  为半焦距; 孔径角  $\alpha$  为边界光线  $BF_2$  与光轴的夹角, 边界角  $\beta$  为边界光线  $F_1B$  与光轴的夹角, 边界角  $\gamma$  为边界光线  $F_1A$  与光轴的夹角;  $h$  为积分器的深度,  $d$  为积分器的口径(正方形内腔的边长),  $l$  为积分器入口与第二焦面的距离;  $h_{\text{lamp}}$  为氙灯的高度。

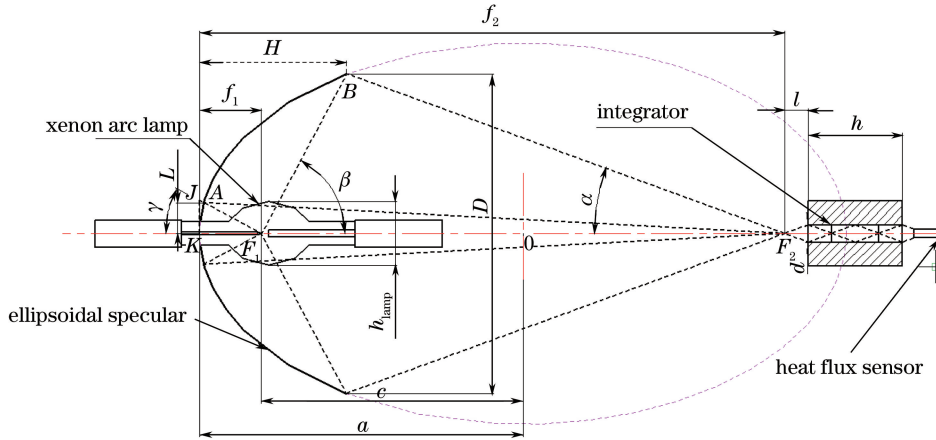


图 1 光学元件布局图

Fig. 1 Layout of optical components

短弧氙灯位于  $F_1$  处(阴极斑与  $F_1$  重合),发出的光经椭球聚光镜内表面反射汇聚到椭球镜的第二焦面上,具有一定汇聚角的光线进入积分器后,在积分器内部多次反射(反射次数由光线进入积分器的孔径角  $\alpha$  和积分器长径比决定),光线充分混合,从而在积分器出口获得均匀的辐照面,为热流传感器标定提供热流源。

该标定系统的设计目标是在积分器出口处获取均匀的高密度辐射热流。为了定量研究标定系统的性能变化,定义积分器出口辐照度  $E_{\text{out}}$ 、不均匀度  $I$ 、入口辐照度  $E_{\text{in}}$  以及椭球镜转移效率  $\eta$  等 4 个评价指标:

$$E_{\text{out}} = Q_{\text{out}} / d_{\text{target}}^2, \quad (1)$$

$$I = (E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) / (E_{\text{max}} + E_{\text{min}}), \quad (2)$$

$$E_{\text{in}} = Q_{\text{in}} / d_{\text{target}}^2, \quad (3)$$

$$\eta = Q_{\text{in}} / P \eta_{\text{electricity}}, \quad (4)$$

式中  $d_{\text{target}}$  表示积分器入口和出口处同样大小的正方形接收面边长,  $Q_{\text{out}}$  表示进入积分器出口处接收面的辐射通量,  $E_{\text{max}}$  和  $E_{\text{min}}$  分别为该接收面上的最大和最小辐照度,  $Q_{\text{in}}$  表示进入积分器入口处接收面的辐射通量,  $P$  为氙灯电功率,  $\eta_{\text{electricity}}$  为电光转换效率。在电功率  $P$  一定时,希望标定系统中椭球镜转移效率  $\eta$ 、积分器入口辐照度  $E_{\text{in}}$  和出口辐照度  $E_{\text{out}}$  尽可能高,且不均匀度  $I$  小于 3%。

## 3 氙灯的选择与定位

氙灯具有功率高、发光稳定和与太阳光谱类似等特性,常被作为太阳模拟器光源的首选。在已建成的弧光灯热流标定系统中使用的就是高功率短弧氙灯,电功率最高可达 10 kW,选择功率如此高的氙灯,就是为了尽可能在积分器出口处获取较高的辐照度。

### 3.1 氙灯弧长对辐照度的影响

除了功率直接影响辐照度外,氙灯的弧长<sup>[9]</sup>也是一个重要因素,每种氙灯的确切弧长不易被直接测量,但可根据其亮度曲线进行合理估计。文献[10]详细阐述了氙灯仿真建模的方法,基于该方法,本文对氙灯弧

长与椭球镜转移效率  $\eta$  和入口辐照度  $E_{in}$  的关系进行了仿真分析(取氙灯电功率为 9 kW, 一般要避免氙灯满功率工作)。以目前使用的氙灯为基准, 设其弧长为  $L_{arc}$ 。在不同大小的接收面上( $d_{target}$  分别为 5、20 mm), 分别仿真了转移效率  $\eta$  和入口辐照度  $E_{in}$  随弧长( $0.8L_{arc}$ 、 $0.9L_{arc}$ 、 $L_{arc}$ 、 $1.1L_{arc}$  和  $1.2L_{arc}$ ) 的变化关系, 椭球镜参数与现使用设备一致( $f_1=85$  mm,  $f_2=680$  mm,  $D=430$  mm)。

转移效率和入口辐照度随弧长的变化结果如图 2 所示, 在不同大小的接收面上, 随着弧长的增长, 转移效率和入口辐照度都在减小。这表明弧长越短, 第二焦面上的成像光斑能量密度越高, 固定大小接收面上入射的辐射通量就越高, 转移效率和入射辐照度也会相应增大。此外, 从图 2 还可以看到,  $d_{target}=5$  mm 的接收面转移效率较低, 但入射辐照度却很高。小的接收面转移效率低是因为面积小, 入射的总能量相对就少; 而入射辐照度高是由于氙灯并不是理想点光源<sup>[9]</sup>, 其亮度由中心向两侧递减, 即大部分能量集中在光轴附近, 所以以光轴为中心, 越小的接收面其入射辐照度越高。综上可知, 应选择功率较大、弧长较短的氙灯, 这样可以获得较高的入口辐照度, 从而得到较高的出口辐照度(热流密度)。

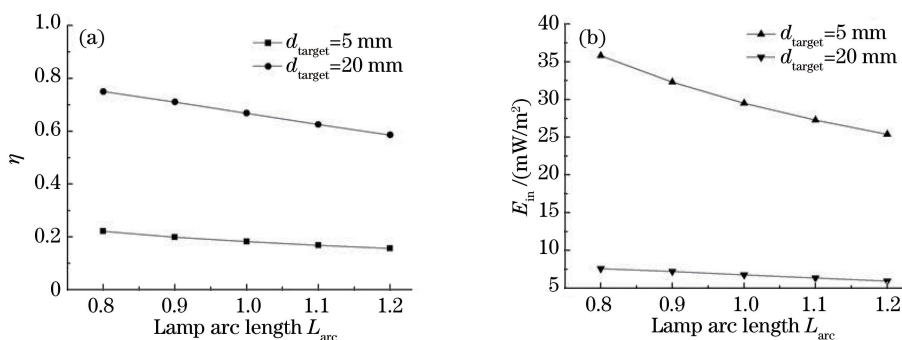


图 2 (a)  $\eta$  和 (b)  $E_{in}$  随  $L_{arc}$  的变化  
Fig. 2 Variations of (a)  $\eta$  and (b)  $E_{in}$  with  $L_{arc}$

### 3.2 氙灯位置的确定

氙灯实物(最高电功率为 10 kW)如图 3(a)所示, 尖端为阴极, 钝头为阳极; 该氙灯的配光曲线如图 3(b)所示,  $0^\circ$  方向为阴极,  $180^\circ$  方向为阳极。当氙灯水平放置(图 1)时, 在三角形  $F_1JK$  中有

$$f_1 = |JK| / \tan \gamma, \tag{5}$$

式中希望获得较小的  $f_1$ , 这样能减小椭球镜深度  $H$  和口径  $D$ , 从而在加工过程中得到具有较高精度的曲面(椭球镜深度和口径越大, 加工难度越大)。角度  $\gamma$  根据图 3(b)中的配光曲线已确定, 为了获取较小的  $f_1$ , 需要尽量减小  $|JK|$  的值, 但  $|JK|$  的值过小, 会使边界光线  $AF_2$  更靠近氙灯发光区, 从而导致氙灯过热, 影响其正常工作。结合氙灯外形尺寸和安装的安全距离, 当  $|JK|$  取氙灯高度  $h_{lamp}$  时, 既利于氙灯的安全工作, 又能获取较小的  $f_1$ 。以图 3 所示氙灯为例,  $h_{lamp}=40$  mm, 并取  $\gamma=27^\circ$ , 则  $f_1=78.5$  mm。

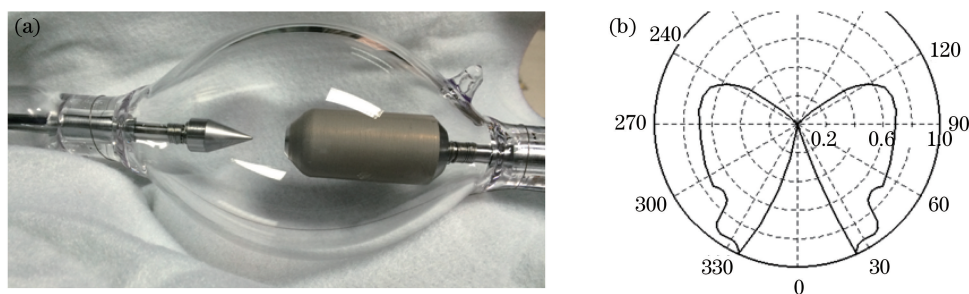


图 3 氙灯的 (a) 照片和 (b) 配光曲线  
Fig. 3 (a) Photo and (b) distribution curves of the xenon arc lamp

## 4 积分器的设计与优化

积分器不仅影响接收面辐照度的大小, 而且影响其均匀性。由 3.1 节可知积分器口径  $d$  越小, 其出口辐

照度  $E_{out}$  越大,可是为了能够覆盖传感器感应面,积分器口径又不能过小。另外,光进入积分器后,其反射次数越多,出口光斑的均匀性越好,但由于在积分器内部光线的每次反射都会造成能量损失,所以反射次数又不宜过多。根据光的反射规律,当  $l=d/(2\times\tan\alpha)$  时,积分器的深度  $h$  受口径  $d$  和孔径角  $\alpha$  的约束如下:

$$\frac{(n-1)\times d}{\tan\alpha} \leq h \leq \frac{(2n-1)\times d}{2\times\tan\alpha}, \quad (6)$$

式中  $n$  为边界光线  $BF_2$  的反射次数,其值(一般不会大于 5)由代入法获得,依次取  $n$  为 2,3,4,5,代入(6)式中得到  $h$  的 4 个区间;然后通过仿真实验以积分器出口辐射不均匀度小于 3% 为准则,选出符合条件的  $h$  区间;最后再以出口辐照度尽可能大为准,选出最佳  $h$  值。具体如下:针对常见传感器感应面的情况,考虑口径分别为 6、12、17、22 mm 的 4 种积分器;在第 3 节仿真模型上添加不同口径的积分器模块,确定不同口径积分器的最佳深度  $h$ ,分以下两步实施。

1) 确定反射次数。根据(6)式, $n$  依次取 2、3、4、5。其中,积分器深度  $h$  的值取右边界,且令  $l=0$ ,这样可以充分保证其均匀性,即如果工艺环节有少许偏差,可以将积分器沿光路方向后移,增加第二焦点与积分器入口的距离  $l$ (相当于增加大部分光线的反射次数),就可使积分器的均匀性得到弥补和改善。4 种不同口径积分器出口的辐照度  $E_{out}$  和不均匀度  $I$  随反射次数  $n$  的变化情况如图 4 所示。由图 4(a)可知,随着反射次数的增加,出口辐照度均匀下降,这是因为每次反射均有能量损失;从图 4(b)可知,反射次数为 2 时 4 个积分器出口光斑的均匀性都较差,当  $n$  增加至 3 时,均匀性得到大幅提高,不均匀度小于 3%。需要说明的是,因为在进入  $d=6$  mm 的积分器的光辐射中,能量密度极高的阴极斑所占比重明显高于后三种口径的积分器<sup>[10]</sup>,因此其出口辐照度  $E_{out}$  明显高于后三种,且不均匀度  $I$  下降趋势也与后三种略有不同。随着  $n$  进一步增大,不均匀度  $I$  的整条曲线呈下降趋势,且均小于 3%。考虑到需保证有较高的出口辐照度  $E_{out}$ , $n$  的值不宜太大,故取  $n=3$ 。

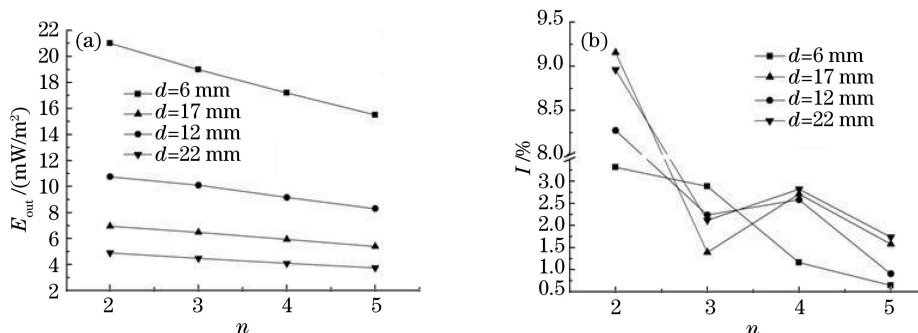


图 4 (a)  $E_{out}$  和 (b)  $I$  随  $n$  的变化

Fig. 4 Variations of (a)  $E_{out}$  and (b)  $I$  with  $n$

2) 确定最优的积分器深度  $h$ 。针对不同口径的积分器,根据(6)式,在  $n=3$  时,从对应的积分器深度区间里寻找较优的  $h$ ,原则是不均匀度水平相近时,尽量选择较小的  $h$ ,这样有利于获得较高的  $E_{out}$ 。对口径  $d=6$  mm 的积分器, $n=3$  时  $h$  的值在区间 33~49 mm 内,以 4 mm 为步长,将不同的积分器深度分别代入仿真模型进行计算,得到  $h$  的较优区间为 37~41 mm,即设计口径为 6 mm 的积分器时,积分器深度可取 37~41 mm 区间内的任意值,此时对应的出口辐照度约为 18.5 mW/m<sup>2</sup>,不均匀度约为 2.2%。其他口径的积分器也优化出了最终结果,如表 1 所示。

表 1 不同口径积分器的较优  $h$  值

Table 1 Superior  $h$  values of integrators with different calibers

$d$ /mm	Simulation interval /mm	Step size /mm	Superior $h$ /mm	$E_{out}/(mW/m^2)$	$I$ /%
6	$33 < h < 49$	4	37~41	18.5	2.2
12	$67 < h < 95$	7	67~74	9.9	2.4
17	$95 < h < 131$	9	95~104	6.4	1.5
22	$123 < h < 175$	13	136~149	4.3	2.2

## 5 椭球镜的设计与优化

椭球镜的功能是将氙灯发出的光尽可能多地收集后聚焦于第二焦点,然后使其进入积分器。反射率一定的条件下,椭球镜的几何参数决定着这一聚焦过程。下面将结合图 1,对椭球镜各参数间的关系及其对积分器出口热流密度水平的影响进行分析。

由第 3 节可知,当短弧氙灯选定后,其外形尺寸和配光曲线也相应确定,按照(5)式,椭球镜的焦距  $f_1$  会首先被确定。另外根据椭圆方程定义有

$$\frac{D}{2 \times \sin \alpha} + \frac{D}{2 \times \sin \beta} = 2 \times a, \quad (7)$$

又如图 1 所示的几何关系,在三角形  $F_1BF_2$  中有

$$\frac{D}{2 \times \tan \alpha} + \frac{D}{2 \times \tan \beta} = |F_1F_2| = 2 \times c, \quad (8)$$

然后用(8)式比上(7)式,得到离心率  $e$ :

$$e = \frac{c}{a} = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha + \sin \beta}, (0 < \alpha < 90^\circ, 0 < \beta < 90^\circ), \quad (9)$$

且可推算出近轴放大倍率  $M$  与离心率  $e$  有如下关系:

$$M = \frac{f_2}{f_1} = \frac{a + c}{a - c} = \frac{1 + e}{1 - e}, (0 < e < 1)。 \quad (10)$$

若希望在第二焦面得到能量比较集中的光斑,就应该选择较小的  $M$ ,由(10)式可知, $e$  越小则  $M$  越小。又由(9)式可知, $e$  随孔径角  $\alpha$  和边界角  $\beta$  单调递减,即单从获得较小离心率  $e$  的角度看, $\alpha$  和  $\beta$  应尽可能大;然而, $\beta$  受氙灯配光曲线里的发光角度限制,只能在其附近波动,不宜过大,否则大量光线会跑出椭球镜,导致转移效率  $\eta$  和入口辐照度  $E_{in}$  变小;故需要在权衡积分器出口均匀性和辐照度的前提下,尽可能增大  $\alpha$ 。下面将给出具体的优化求解过程。

1) 确定较优的  $\beta$ 。在积分器入口处放置两个接收面( $d_{target}$  分别为 5、20 mm),以转移效率  $\eta$  最大为优化原则,通过仿真比较找出较优的  $\beta$ ,仿真结果如图 5 所示,可以看到,在不同大小的接收面上,对于不同的孔径角  $\alpha$ ,转移效率  $\eta$  都随  $\beta$  先增大再逐渐减小。由图 3(b)的配光曲线可知,氙灯阳极发出的边界光线角度大约为  $122^\circ$ ,即边界角  $\beta$  取  $58^\circ$  刚好能将所有的光线包络住。但从图 5 的仿真结果看,最优的  $\beta$  值大约为  $62^\circ$ ,这主要是因为靠近边界光线  $122^\circ$  处的光辐射强度较弱,因  $\beta$  增大而逸出椭球镜的光辐射量较小;与此同时, $\beta$  增大促使离心率  $e$  减小,从而使聚焦程度加强,进而使接收面上通过的光辐射量增多。最终导致因  $\beta$  增大而逸出椭球镜的光辐射小于因聚焦程度加强而增加的辐射,所以  $\beta$  的起初增大会导致  $\eta$  增大。但如果  $\beta$  继续增大,前者逸出的光辐射就会大于后者增加的光辐射, $\eta$  也会迅速减小。

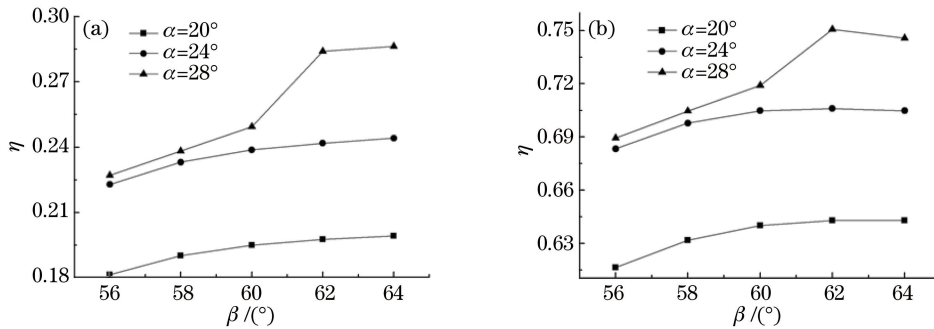


图 5 不同大小的接收面上  $\eta$  随  $\beta$  的变化。(a)  $d_{target} = 5$  mm;(b)  $d_{target} = 20$  mm

Fig. 5 Variations of  $\eta$  with  $\beta$  on receiving targets with different sizes. (a)  $d_{target} = 5$  mm; (b)  $d_{target} = 20$  mm

2) 确定较优的  $\alpha$ 。从图 5 中已可看出增大  $\alpha$  能提高转移效率,但随着  $\alpha$  的增大,光束的分布将变得极不均匀,因此必须综合考虑  $\alpha$  的大小。将  $\beta$  设为较优值  $62^\circ$ ,积分器口径的边长取 22 mm,反射次数设为 3 和 4,分别进行仿真,通过考察不同  $\alpha$  值下积分器出口的辐照度和均匀性来寻找较优的  $\alpha$ ,仿真结果如图 6 所示。

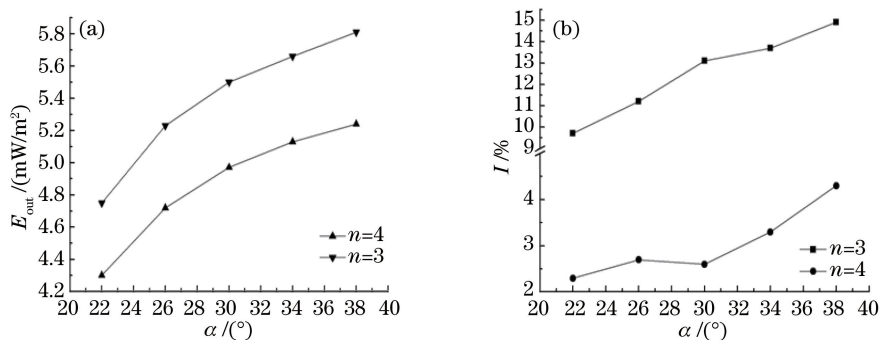


图 6 (a)  $E_{out}$  和 (b)  $I$  随  $\alpha$  的变化

Fig. 6 Variations of (a)  $E_{out}$  and (b)  $I$  with  $\alpha$

从图 6 可以看到,在积分器深度(由反射次数  $n$  控制)一定时,出射辐照度  $E_{out}$  随  $\alpha$  的增大而增大,但不均匀度也在增加;结合图 6(a)和(b)可知,当  $\alpha$  取  $30^\circ$  时,既能保证不均匀度不大于  $3\%$ ,又能获得较大的出口辐照度。

至此,在给定氙灯的条件下,已经优化出了较优的  $\alpha$  和  $\beta$ ,则由(9)式和下式,就可求出椭球镜的相关设计参数:

$$f_1 = a - c. \tag{11}$$

现使用标定系统和新标定系统的性能比较如表 2 所示。首先,新系统能保证均匀性,即针对不同口径的积分器其不均匀度  $I$  都小于  $3\%$ ;其次,孔径角  $\alpha$  由  $24^\circ$  变为了  $30^\circ$ ,使得椭球镜离心率由  $0.78$  减小到  $0.72$ ,再结合参数更加合理的积分器,最终使积分器出口的平均辐照度提高了  $33\%$ ;最后,短焦距  $f_1$  由  $85$  减小到了  $78.5$ ,再加上离心率的减小,使得椭球镜的截面直径  $D$  和深度  $H$  分别减小了约  $16\%$  和  $18\%$ ,这样不但节省了材料,而且减小了加工难度,有利于设备加工精度的提高。

表 2 新标定系统和现使用标定系统的性能比较

Table 2 Comparison of performance between present calibration system and new calibration system

Item	Present calibration system				New calibration system			
$d / \text{mm}$	6	12	17	22	6	12	17	22
$E_{out} / (mW/m^2)$	18.5	9.9	6.4	4.3	26.1	12.6	7.84	5.5
$I / \%$	2.2	2.4	1.5	2.2	2.7	1.9	2.7	2.3
$f_1 / \text{mm}$	85				78.5			
$f_2 / \text{mm}$	680				487.6			
$e$	0.78				0.72			
$D / \text{mm}$	430				361.4			
$H / \text{mm}$	212				174.6			

## 6 结 论

基于光学仿真,给出了弧光灯热流标定系统的优化设计方法。首先确定了系统的设计目标,然后定量分析了氙灯、椭球镜和积分器三者间各参数的制约关系,并依据从氙灯到积分器再到椭球镜的设计思路,结合仿真对每个元件的具体参数值进行了优化,最终得到了一个各项参数较好的标定系统。在满足不均匀度小于  $3\%$  的前提下,新系统积分器出口的平均热流密度比原系统提高了  $33\%$ ;椭球镜的截面直径和深度分别减小了约  $16\%$  和  $18\%$ ,在同水平工艺条件下,这一结果可使椭球镜镜面的加工精度更高。

## 参 考 文 献

- 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.
- 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. 气动热与热防护试验热流测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 194-196.
- 3 Sheets R E, Pierce R L. Transient calorimeter calibration system[R]. Nasa Sti/recon Technical Report N, 1975: 1-56.
- 4 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]. Journal of Solar Energy Engineering, 2007, 129(4): 405-411.
- 5 Liu Hongbo, Gao Yan, Wang Li, *et al.* Design of high-flux solar simulator[J]. Chinese Optics, 2011, 4(6): 594-599.
- 刘洪波, 高 雁, 王 丽, 等. 高倍聚光太阳模拟器的设计[J]. 中国光学, 2011, 4(6): 594-599.
- 6 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.
- 7 Gu Guochao, Wang Li, Liu Hongbo, *et al.* Optical design of solar simulator used for transient calorimeter calibration system[J]. Chinese Optics, 2012, 5(6): 630-637.
- 顾国超, 王 丽, 刘洪波, 等. 瞬态热量标定系统的太阳模拟器光学系统设计[J]. 中国光学, 2012, 5(6): 630-637.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 Zhu Xinxin, Wang Hui, Yang Qingtao, *et al.* Simulation design of the arc lamp system for heat flux sensor calibration [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0422003.
- 朱新新, 王 辉, 杨庆涛, 等. 弧光灯热流标定系统光源的仿真设计[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0422003.