

文章编号: 1005-5630(2023)03-0058-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.003.008

# 基于 Zemax 的新型匀光鳞甲反光杯系统设计

马 鹏, 李奇蒙, 胡彦秋, 周蕴诗, 孙 睿, 凌福日, 王双保,

徐智谋, 张学明

(华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为进一步优化传统反光杯在匀光、防眩光等方面的问题, 基于 Zemax 仿真软件设计出了一种匀光性能优越的鳞甲反光杯。仿真结果表明, 在杯前 25 m 处的配光屏幕上, 最大光照强度为 234 lx, 中心 HV 点的光照强度大于  $0.80 E_{\max}$ , 各指标均符合国标 GB 25991—2010《汽车用 LED 前照灯》的要求。将鳞甲反光杯与微透镜阵列相结合, 使配光屏幕上的最大光照强度减小至 59.51 lx, 在各项指标仍符合国家标准的情况下, 该系统的光斑能量更加均匀, 且中心区域的光强进一步降低, 光斑边缘过渡更加柔和, 防止汽车远光灯产生眩光的效果更好, 可以大量应用于汽车前照远光灯。

**关键词:** 光学设计; Zemax; 汽车前照远光灯; 鳞甲反光杯; 微透镜阵列

**中图分类号:** TN 202 **文献标志码:** A

## Design of a new uniform light squamous reflective cup system based on Zemax

MA Peng, LI Qimeng, HU Yanqiu, ZHOU Yunshi, SUN Rui, LING Furi, WANG Shuangbao,  
XU Zhimou, ZHANG Xueming

(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to further optimize the traditional reflective cup for uniform light, anti-glare and other aspects of the problem, a new reflective cup based on Zemax is designed. The simulation results for using the squamous reflective cup show that the maximum light intensity at the front 25 m of the reflective cup is 234 lx, and the light intensity at the center HV point is greater than  $0.80 E_{\max}$ . All indicators meet the requirements of the national standard GB 25991—2010 automotive headlamps with LED sources. The squamous reflective cup can also combine with the micro-lens array. While meeting national standards, the spot energy is more uniform. The central area of light intensity has been further reduced, and the spot edge transition is more smooth. The effect of preventing glare from high beam is better. The system can be widely used in automobile headlamp.

**Keywords:** optical design; Zemax; automotive headlamp; squamous reflector; micro-lens array

收稿日期: 2022-10-11

基金项目: 华中科技大学大学生创新创业训练计划院级项目(GD2022004)

第一作者: 马 鹏(2000—), 男, 本科生, 研究方向为光学设计。E-mail: 1262856606@qq.com

通信作者: 张学明(1968—), 男, 讲师, 研究方向为光学设计。E-mail: optzhang@163.com

## 引言

反光杯是用点光源灯泡作为光源,用于远距离聚光照明的、常见的反射式杯型照明系统。它具有准直性良好、光能利用率高的优点<sup>[1]</sup>。通过改变反光杯的面型以及光源类型,可以将反光杯应用于许多不同的场景,以满足不同的需求,如汽车车灯、家用照明、科学研究等领域<sup>[2]</sup>。

现阶段,LED反光杯已逐渐应用于汽车前照灯系统,但反光杯的杯面是传统的弧面型。传统的弧面反光杯有许多不足之处:匀光效果不够好;防眩光效果达不到国家标准;在杯体结构确定的情况下难以改变光束角等问题。将反光杯的杯面设计为鳞甲叠加,可以有效提升光照的均匀度,防止行车过程中出现眩光的问题。此外,将鳞甲反光杯和微透镜阵列相结合可以进一步提高反光杯的匀光性能,对扩展反光杯的应用场景具有积极作用。由于Zemax仿真软件可以模拟并建立光学系统模型,分析光学系统成像<sup>[3]</sup>,且其中的宏语言编程功能提供了更为便捷、灵活的模型建立方式,可以解决许多在编辑器上无法实现的控制,因而本文将通过Zemax软件及其宏语言编程建立鳞甲反光杯和微透镜阵列相结合的系统模型,并对仿真结果进行分析和优化。

## 1 鳞甲反光杯设计原理

### 1.1 抛物线公式

鳞甲反光杯基于抛物面构成,其横截面为一抛物线,抛物线方程为

$$y^2 = 2pz \quad (1)$$

式中,  $p = 2f$ ,  $f$ 为抛物线的焦距。利用式(1)可得,在距离坐标原点 $z$ 处,抛物面横截面的半径为

$$y = \sqrt{2pz} \quad (2)$$

### 1.2 横截面的计算

横截面的周长 $C$ 为

$$C = 2\pi y \quad (3)$$

由式(2)可得横截面的周长

$$C_{(i)} = 2\pi y_{(i)} = 2\pi \sqrt{2pz_{(i)}}, \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (4)$$

设在周长 $C_{(i)}$ 上放置 $n$ 枚鳞片,则每个鳞片的线度为

$$\Delta l_{\varphi(i)} = \frac{C_{(i)}}{n} = \frac{2\pi y_{(i)}}{n} = y_{(i)} \Delta \varphi, \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (5)$$

式中,  $\Delta \varphi = \frac{2\pi}{n}$ 为相邻两个鳞片的夹角。

为生成四边形的鳞甲,在圆周上排列的相邻面元需重叠二分之一,因此以 $\Delta l_{\varphi(i)}$ 为半径,在曲率半径为 $R$ 的球面上截取鳞片,如图1所示。

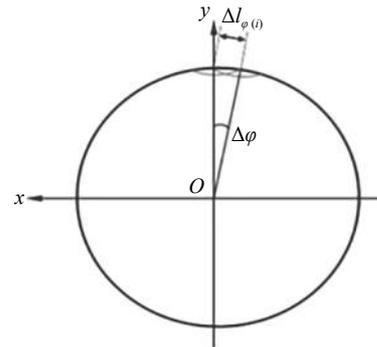


图1 鳞甲排列示意图

Fig. 1 Schematic diagram of light squamous reflector

由图1可知: $R$ 越大,则鳞片越薄,反光杯的发光角度越小; $R$ 越小,则鳞片越厚,反光杯的发光角越大。

### 1.3 径向的计算

从 $yOz$ 平面观察反光杯,若沿 $z$ 轴方向增加 $\Delta z$ ,则 $y$ 轴方向增加 $\Delta y$ ,母线方向增加 $\Delta l_z$ 。当 $\Delta l_z = \Delta l$ 时,即可使径向排列的两个相邻面元有二分之一的重叠,如图2所示。

依勾股定理,得

$$\Delta l_{z(i+1)}^2 = \Delta z_{(i+1)}^2 + \Delta y_{(i+1)}^2 \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可得

$$\Delta z_{(i+1)}^2 + \Delta y_{(i+1)}^2 = [(y_i + \Delta y_{(i+1)}) \Delta \varphi]^2 \quad (7)$$

再对式(1)求导,得

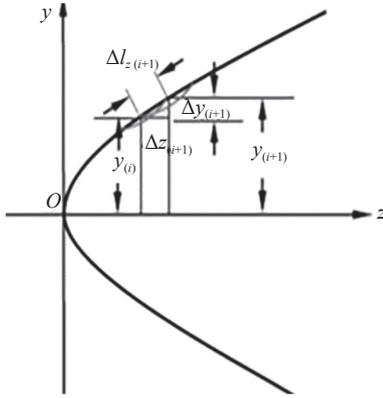


图 2 径向鳞甲排列示意图

Fig. 2 Schematic diagram of axial for the light squamous reflector

$$2ydy = 2zdz \quad (8)$$

通过变换, 得

$$\Delta y_{(i+1)} = \frac{p}{y_{(i)}} \Delta z_{(i+1)} \quad (9)$$

将式(7)代入, 得

$$\Delta z_{(i+1)}^2 + \left( \left( \frac{p}{y_{(i)}} \right) \Delta z_{(i+1)} \right)^2 = \left[ \left( y_{(i)} + \frac{p}{y_{(i)}} \Delta z_{(i+1)} \right) \Delta \varphi \right]^2 \quad (10)$$

将式(10)展开, 得

$$\left[ 1 + \frac{p}{y_{(i)}} (1 - \Delta \varphi^2) \right] \Delta z_{(i+1)}^2 - 2p \Delta \varphi^2 \Delta z_{(i+1)} - y_{(i)}^2 \Delta \varphi^2 = 0 \quad (11)$$

显然, 式(11)是一个关于  $\Delta z_{(i+1)}$  的一元二次方程, 用  $A, B, C$  来替代此一元二次方程的 3 个参数, 则式(11)可简化为:

$$A \Delta z_{(i+1)}^2 - B \Delta z_{(i+1)} - C = 0 \quad (12)$$

式中:  $A = 1 + \frac{p}{y_{(i)}} (1 - \Delta \varphi^2)$ ;  $B = 2p \Delta \varphi^2$ ;  $C = y_{(i)}^2 \cdot \Delta \varphi^2$ 。

由以上讨论可知, 给定焦距  $f$ ,  $z_{(i)}$  以及鳞甲数  $n$ , 可确定参数  $p$ ,  $y_{(i)}$  和  $\Delta \varphi$  的值。再将  $p$ ,  $y_{(i)}$  和  $\Delta \varphi$  代入式(11), 即可得  $\Delta z_{(i+1)}$  的值。循环利用公式, 可得到不同点的位置坐标。

#### 1.4 鳞片倾角及鳞片放大率的计算

本文使用  $\alpha$  表示鳞片倾角, 用  $\beta$  表示鳞片放

大率。

由式(8)可知, 在抛物面上每个坐标点的斜率为

$$\tan \alpha = \frac{dy_{(i)}}{dz_{(i)}} = \frac{p}{y_{(i)}} \quad (13)$$

$$\alpha = \arctan \frac{p}{y_{(i)}} \quad (14)$$

第二个鳞片比第一个鳞片放大了  $\beta_{(i)}$  倍, 得

$$\beta_{(i)} = \frac{\Delta l_{z(i+1)}}{\Delta l_{\varphi(i)}} = \frac{r_{z(i+1)}}{r_{z(i)}} \quad (15)$$

将式(5)、式(6)代入, 得

$$\beta_{(i)} = \frac{\sqrt{\Delta z_{(i+1)}^2 + \Delta y_{(i+1)}^2}}{y_{(i)} \Delta \varphi} \quad (16)$$

通过以上计算可得到设计鳞甲反光杯所需要的所有参数值<sup>[4]</sup>。

## 2 设计方法

### 2.1 设计要求

依照 2012 年 1 月 1 日实施的 GB 25991—2010《汽车用 LED 前照灯》<sup>[5]</sup>, 汽车的前照灯远光应具有良好的照明效果, 其配光性能应在距离前照灯中心前 25 m、与中心基准线垂直的平面配光屏幕上进行测试, 各测试点、区的位置如图 3 所示。

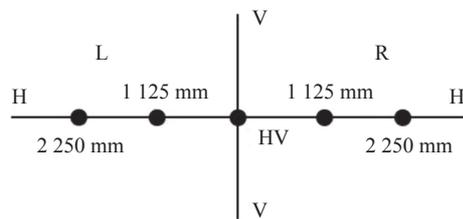


图 3 配光屏幕

Fig. 3 Light distribution screen

远光在配光屏幕上的照度限制如表 1 所示。根据国标所列配光要求, 以及常见的 A1 型汽车反光杯的大小尺寸, 可得到反光杯的设计要求<sup>[6]</sup>, 如表 2 所示。

表1 照度限制  
Tab. 1 Illumination limitation

测试点或区域	照度/lx
$E_{\max}$	$\geq 48$ 且 $\leq 240$
HV点	$\geq 0.80 E_{\max}$
HV点至1 125 L和R	$\geq 24$
HV点至2 250 L和R	$\geq 6$

表2 汽车反光杯设计要求  
Tab. 2 Design requirements of automobile reflective cup

变量	数值
深度	$\leq 80$ mm
杯口直径	100 mm

## 2.2 编程方法

Zemax 软件具有 ZPL 宏编程扩展功能,能够更加灵活地解决用户的需求。因此,为了实现任意圈数、任意鳞甲数反光杯的建模,使用 Zemax 编程语言<sup>[7]</sup>进行建模。首先使用 FOR-NEXT 循环语句以单个鳞甲为基本单位生成一圈鳞甲,再次使用 FOR-NEXT 循环语句进行嵌套,径向将一圈鳞甲扩展为完整的鳞甲反光杯。这样,若需要改变鳞甲反光杯的抛物线方程或者鳞甲数,则只需修改代码中  $p$ (抛物线的焦距)、 $n$ (每圈的鳞甲数)、 $q$ (鳞甲圈数)参数的值即可。

根据汽车反光杯的尺寸要求,确定杯口半径为 50 mm,深度为 75 mm。将  $y=50$  mm,  $z=75$  mm 代入抛物线方程,得到焦距  $p=16.667$  mm,满足条件的鳞甲的圈数为 10 圈。由式(11)计算可得,每圈的鳞甲数设定为 24。这样就确定了程序中所需的所有参数值。将编写好的程序放入 Zemax 软件根目录下的 Macros 文件夹,通过 Zemax 软件的宏即可运行程序,得到设计好的鳞甲反光杯模型。

## 2.3 光源选择

为更加契合实际,仿真所需要的 LED 光源组件的信息直接从汽车灯珠供应商的官网下载。

选用了一款 OSRAM 的产品 GH\_CSBRM4\_24, OSOLON SQUARE-Hyperred, 其尺寸大小为  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1.86\text{ mm}$ 。将下载好的文件放入相应的根目录,即可在 Zemax 软件中加载,得到灯珠的模型,如图 4 所示。将其光通量设置为 3 000 lm,键入 Zemax 非序列元件编辑器中。

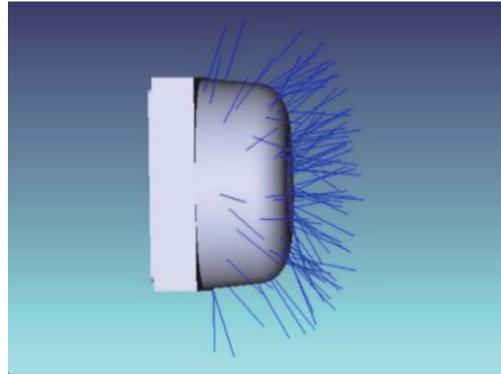


图4 LED的3D模型

Fig. 4 3D model of LED

## 3 系统仿真

### 3.1 鳞甲反光杯的仿真

首先,在 Zemax 非序列模式下将物体类型选为非球面,将 Conic 系数设置为 -1,材料选择设置为 MIRROR,曲率半径设置为 16.667,即可得到一个与所确定抛物线方程相符的普通反光杯<sup>[8]</sup>。再将所下载的光源组件依次加载,得到与所设计的鳞甲反光杯系统相对应的普通反光杯系统,如图 5 所示。此时仿真结果的不同只取决于反光杯的类型。根据检测标准,在其前方 25 m 处设置一长、宽均为 7 920 mm 的矩形探测器,将其  $X$ 、 $Y$  像素均设置为 100,颜色设置为 2。通过光线追迹,可得到 25 m 处矩形探测器的仿真结果。

通过 Zemax 中非序列非相干光照度图可以很便捷地查看探测器上光照度的分布情况,其横纵坐标分别为  $x$ 、 $y$ ,单位为 mm。如图 6 所示,分析可知,最大非相干照度达到了 2 643 lx,位于(13, 4)处,大致位于 HV 点,即屏幕中心,与国标所规定的最大非相干照度应不小于 48 lx,不大于 240 lx 的标准不相符。相应测试点的光照

度如表 3 所示, 可以看到, 由于光照面积较小, 距中心较远的测试点基本没有光线照射。说明普通反光杯具有较好的准直效果, 但其匀光的效果较差, 使得测试屏幕上中心区域光照强度过大, 容易使对向来车的司机产生眩光, 不利于安全驾驶。

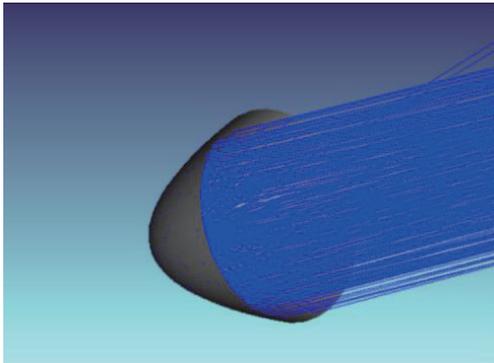


图 5 普通反光杯的 3D 模型  
Fig. 5 3D model of common reflector

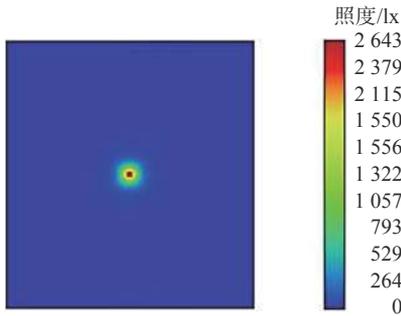


图 6 普通反光杯在 25 m 处矩形探测器的伪彩色非相干光照图  
Fig. 6 Pseudo-color incoherent illuminance of rectangular detector of common reflector at 25 m

表 3 反光杯各测试点照度值  
Tab. 3 Illumination value of each test point of reflector

测试点或区域	照度/lx
$E_{\max}$	2 643
HV点	$2\ 558 \geq 0.80 E_{\max}$
HV点至1 125 L和R	0
HV点至2 250 L和R	0

接着对设计的鳞甲反光杯系统进行仿真。将编辑好的鳞甲反光杯程序通过宏加载, 得到由大小不同的标准面交叠而成的鳞甲反光杯, 加入同样的光源组件以及矩形探测器, 所得 3D 模型如

图 7 所示。进行光线追迹, 得到所设计的鳞甲反光杯系统的仿真结果。如图 8 所示, 25 m 处探测器的最大非相干照度为 234 lx, 位于(47, -24)处, 各个测试点的照度值如表 4 所示, 与国标对比可知均符合相关标准。对比普通反光杯的仿真结果, 可以看到鳞甲反光杯在测试屏幕上的光照面积更大, 而相应点的非相干照度却减小为普通反光杯的十分之一, 说明鳞甲反光杯除了具有较好的准直效果外, 还具有较好的匀光以及防眩光

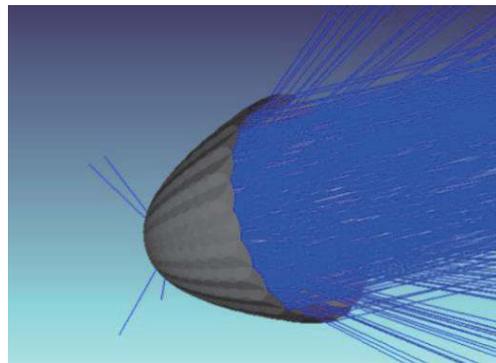


图 7 鳞甲反光杯的 3D 模型  
Fig. 7 3D model of squamous reflector

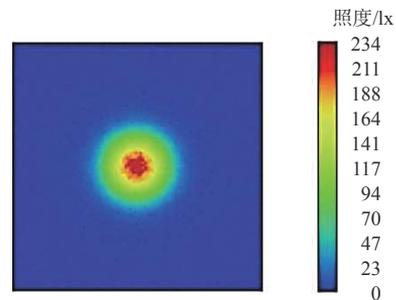


图 8 鳞甲反光杯在 25 m 处矩形探测器的伪彩色非相干光照图  
Fig. 8 Pseudo-color incoherent illuminance of rectangular detector of squamous reflector at 25 m

表 4 鳞甲反光杯各测试点照度值  
Tab. 4 Illumination value of each test point of the scale armor reflector

测试点或区域	照度/lx
$E_{\max}$	234.000
HV点	$201.765 \geq 0.80 E_{\max}$
HV点至1 125 L和R	24.963
HV点至2 250 L和R	6.057

能力,应用于汽车前照灯,可以有效防止眩光,且能帮助司机看到道路前方更加宽广的范围。但同时,由图8可知,光强由中心向四周迅速递减,光强分布均匀性依旧不够高。为进一步分配光强,提高光照的均匀性及柔和度,可以在杯口一定位置添加一组设计好的微透镜阵列<sup>[9]</sup>,组成鳞甲反光杯系统。

### 3.2 微透镜阵列的优化

微透镜阵列是由许多结构相同的透镜组成的阵列。它的每一个透镜都具有传统透镜的基本功能,并且尺寸小,集成度高,组合起来可以实现匀光、扩散等功能。

微透镜阵列可分为折射型微透镜阵列和衍射型微透镜阵列。本文选择使用折射型微透镜阵列进行匀光。当平行光线透过微透镜时,其特性如图9所示。

图9表明,微透镜阵列可以使平行光源经过每一个子透镜汇聚在处于同一焦平面阵列排布的焦点上。基于阵列排布的对称性,经过重新聚焦的小光束具有对称性,故小光束的不均匀性相互抵消,最终形成能量均匀分布的光斑。运用该原理,可以使能量分布不均匀且从中心向四周逐渐减弱的光束在探测器表面变换为能量分布较为均匀的平帽光束。

在反光杯杯口处增加一组微透镜阵列后进行

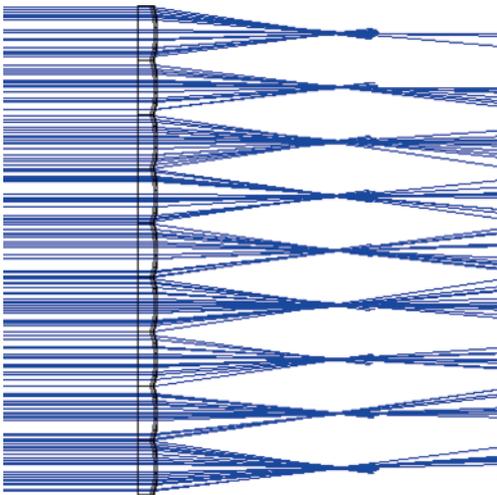


图9 平行光线透过微透镜阵列的光学特性图

Fig. 9 Optical characteristics of parallel rays passing through a microlens array

仿真,结果如图10所示。该阵列略大于反光杯杯口,Number In X设置为11,Number In Y设置为9,半径分别为 $\infty$ 和20 mm,材料为B270玻璃。微透镜阵列的各参数由仿真结果比较得出,系统中其余部分不变。光线追迹所得到的仿真结果如图11所示。

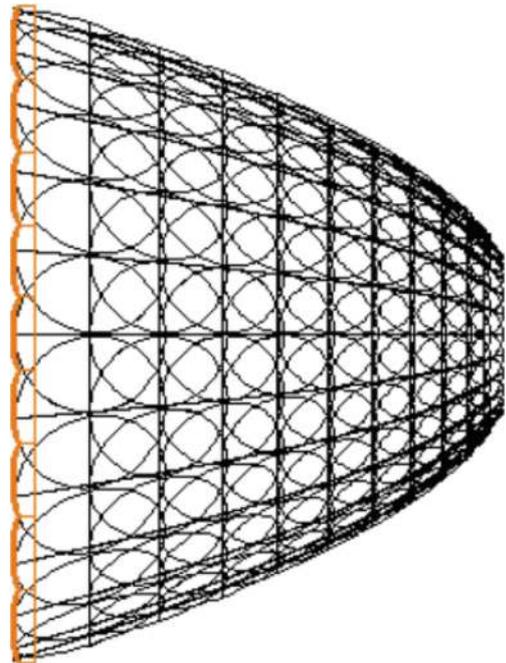


图10 鳞甲反光杯与微透镜阵列的三维布局图

Fig. 10 3D layout of the squamous reflector and micro-lens array

由图11与图8的结果对比得出,在杯口添加微透镜阵列后,25 m处探测器的最大非相干照度 $E_{\max}$ 为59.5 lx,位于(27, 3),各测试点的照度值如表5所示,依然符合汽车远光灯的相关国家标准。并且其光斑能量更加均匀,且光斑增大,中心区域的光强进一步降低,光斑边缘过渡更加柔和,防止汽车远光灯产生眩光的效果更好,提升了LED远光灯的性能。

图12是微透镜阵列的子透镜半径分别改为 $\infty$ 和10 mm后在25 m处矩形探测器的仿真数据。与图7中的结果对比,分析发现,使用该微透镜阵列虽然匀光效果更好,但是最大非相干照度 $E_{\max}$ 为15.3 lx,低于国家标准中要求的最低照度值48 lx。而随着子透镜半径增大,最大非相干照度也随之增大,故经多次仿真,最终确定微透镜阵列子透镜的半径为 $\infty$ 和20 mm恰好能满足国家相关标准且匀光效果最好。

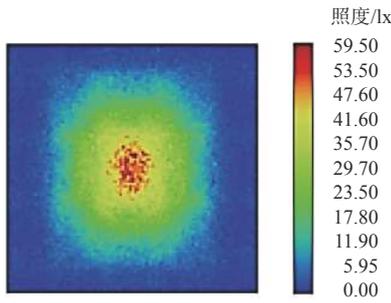


图 11 带微透镜阵列的鳞甲反光杯在 25 m 处矩形探测器的伪彩色非相干光照图

Fig. 11 Pseudo-color incoherent illumination map of a rectangular detector at 25 m in a squamous reflector with a micro-lens array

表 5 带微透镜阵列的鳞甲反光杯各点的照度值  
Tab. 5 Illumination value of each point of the scale armor reflector cup with micro-lens array

测试点或区域	照度/lx
$E_{max}$	59.510
HV点	$53.096 \geq 0.80 E_{max}$
HV点至1 125 L和R	24.479
HV点至2 250 L和R	13.801

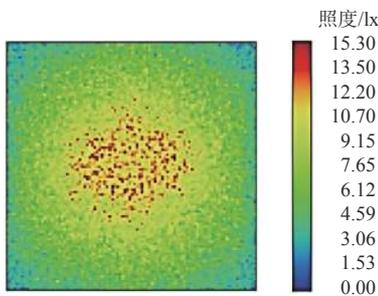


图 12 微透镜半径改为 10 mm 后在 25 m 处矩形探测器的伪彩色非相干光照图

Fig. 12 Pseudo-color incoherent illumination map of the rectangular detector at 25 m after the microlens radius was changed to 10 mm

由理论可知，微透镜阵列的整体面积保持不变时，子透镜数目越多，匀光效果越好<sup>[10]</sup>。但实际应用中，微透镜之间有工艺圆角，会产生杂散光，微透镜数目增加，杂散光也会增加，由此会降低光斑的均匀度。使用奇数个子透镜会使中心两边的通道被光学折叠到中心通道上，产生空间均匀性。图 13 是微透镜阵列的 Number In X 和 Number In Y 分别设置为 13 和 11 后在 25 m

处矩形探测器的仿真数据。与图 11 中的结果对比，分析发现，用该微透镜阵列最大非相干照度  $E_{max}$  为 50.3 lx，符合国家标准中的相应要求，但是光斑较小，光强最大的中心区域过大，边缘过渡不够柔和，能量分布均匀度较低，匀光效果不佳。经过多次仿真，最终得出，微透镜阵列的 Number In X 和 Number In Y 分别设置为 11 和 9 时，其匀光效果最佳。

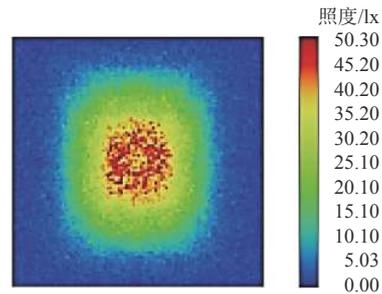


图 13 微透镜阵列数目改为 13×11 后在 25 m 处矩形探测器的伪彩色非相干光照图

Fig. 13 Pseudo-color incoherent illumination map of the rectangular detector at 25 m after the number of micro-lens arrays was changed to 13 multiplied by 11

### 4 误差分析

系统的主要误差来源于光源的尺寸大小。在理想反光杯系统中，光源可以看作一个没有大小的点，放置在反光杯抛物线的焦点处，则其出射光线会平行于反光杯的主轴线出射。仿真时，系统采用的 LED 灯珠有实际大小 ( $R=0.1 \text{ mm}$ )，可能会影响出射光的准直性<sup>[11]</sup>。构建的数学模型如图 14 所示，光源尺寸相对于反光杯最大开口处尺寸极小，可近似认为

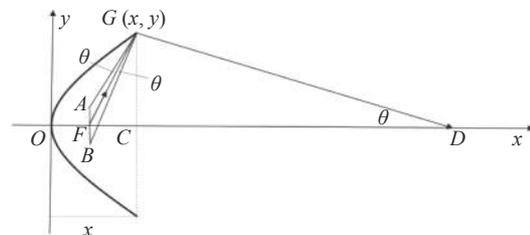


图 14 尺寸计算示意图

Fig. 14 Sketch map of size calculation

$$|AG| \approx |BG|$$

$\triangle ABG$  可近似视为等腰三角形，则

$$\sin \theta = |AB|/(2|AG|)$$

$|AB|$ 可近似视为LED灯珠尺寸,再根据抛物线性质得

$$|AG| = x + p$$

式中: $x$ 为反光杯最大开口处横坐标; $p$ 为反光杯焦距。

代入数据,得到光源几何尺寸引起的出射光误差偏角 $\theta = 0.00109^\circ$ ,该误差偏角远小于预定的出光角度,可近似认为出射光仍为平行出射。

## 5 结 论

本文通过Zemax宏编程设计了一款应用于汽车前照灯的鳞甲反光杯系统,采用灯珠制造商提供的LED光源组件,提高了出射光线光强分布的均匀性;在杯口设置了一组微透镜阵列,在国家相关标准的前提下,使配光屏幕上的光强分布均匀程度进一步得到提高,光斑边缘过渡更加柔和,提高了防眩光能力,有利于安全行车;将微透镜阵列子透镜半径对光强分布的影响进行了仿真,得到了最佳的半径配比。本文设计的鳞甲反光杯系统所用材料较少,在实际生产生活中有广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 杨仲奎,马晋坤.一种光纤背入反射式照明灯:中国, CN201310532465.7[P]. 2015-09-23.
- [2] LAIKIN M. 光学系统设计[M]. 周海宪,程云芳,译. 北京:机械工业出版社,2009:293-298.
- [3] 张以谟.应用光学[M].5版.北京:电子工业出版社,2021:593.
- [4] 苏永道.无需编程设计鳞甲反光杯教程(2)[EB/OL]. (2012-9-24)[2020-10-3]. <https://www.docin.com/p-487522050.html>.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB 25991—2010 汽车用LED前照灯[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [6] 许冰聪,蒋翰星,陈章迪,等.基于Zemax的汽车新型反光杯设计[J].光学仪器,2019,41(4):27-35.
- [7] 讯技光电.ZEMAX学习秘笈-葵花宝典[M].1版.上海:讯技光电科技(上海)有限公司,2005:273-275.
- [8] 林晓阳.ZEMAX光学设计超级学习手册[M].1版.北京:人民邮电出版社,2014:182-198.
- [9] 陈赞吉.基于微透镜阵列的LED汽车前照灯光学系统研究[D].广东:华南理工大学,2014.
- [10] 王彬.微透镜阵列在LED光源中的应用研究[D].江西:南昌航空大学,2013.
- [11] 苏宙平.非成像光学系统设计方法与实例[M].北京:机械工业出版社,2017:44-45.

(编辑:李晓莉)