

doi:10.3788/gzxb20174604.0422001

# 用于 CF-LCoS LED 照明的大角度复眼系统 共轭成像优化设计

刘鹏<sup>1</sup>, 刘钦晓<sup>2</sup>, 周海洋<sup>1</sup>, 江城<sup>1</sup>, 余飞鸿<sup>1</sup>

(1 浙江大学 光电科学与工程学院, 杭州 310027)

(2 重庆理工大学 光电信息学院, 重庆 400054)

**摘 要:**根据 LED 发光特性以及彩色滤光片式硅基液晶芯片特性,从成像光学的角度导出了复眼照明系统的基本成像公式.在此基础上由彩色滤光片式硅基液晶芯片目标区域的大小及其对光束入射角以及 LED 经整形以后的光斑尺寸与发散角的要求,根据推导的复眼系统的基本成像公式计算彩色滤光片式硅基液晶芯片复眼照明系统的初始结构,利用复眼照明系统中的多重共轭成像关系,将复眼成像,中继透镜成像分别优化,最后将两者通过孔径与中间像匹配的基本要求进行复眼阵列组合,设计了基于彩色滤光片式硅基液晶芯片的大照度入射光下的复眼照明系统.该系统以较小的复眼数,在保证彩色滤光片式硅基液晶芯片照明要求的条件下,较好地解决了照明系统效率、均匀性与大角度问题.与传统计算方法相比,该方法简单明了.非成像软件的模拟结果证明该方法准确,均匀性好,效率高.实验样机结果验证了本文所提方法的正确性和有效性.

**关键词:**复眼透镜;多通道成像;照明;彩色滤光片式硅基液晶芯片;LED

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)04-0422001-8

## Fly-eyes Lens System Design Based on the Multiplex Conjugate Imaging Principle for the CF-LCoS Projection with LED Illumination

LIU Peng<sup>1</sup>, LIU Qin-xiao<sup>2</sup>, ZHOU Hai-yang<sup>1</sup>, JIANG Cheng<sup>1</sup>, YU Fei-hong<sup>1</sup>

(1 College of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 School of Optoelectronic Information, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** The basic imaging formula of the fly-eyes illumination system has been deduced from the optical imaging point, according to the characteristics of LED emission and the characteristics of the Color-Filter Liquid Crystal on the Silicon(CF-LCoS). The initial lighting system of the CF-LCoS can be given with the basic formula of the fly-eyes imaging system by considering the size of the target area of the CF-LCoS, the incident angle of the light beam on the CF-LCoS, the requirement of the spot size and the divergence angle after LED's light shaping. Then with the multi-conjugate imaging relationship of the fly-eyes illumination system, the fly-eyes imaging and the relay lens imaging can be optimized, which can be linked up to form a fly-eyes and the illumination system of the CF-LCoS under large illumination angle through the matching principle of the aperture and the intermediate image finally. The problem of lighting system efficiency, uniformity and large incident angle can be solved by using less number of eyes under the condition of ensuring the illumination requirements of the CF-LCoS. This method is simpler and more accurate than the traditional calculation method. The simulation results of the non-imaging software show that the illumination is with good uniformity and high efficiency. Finally, the experimental prototype is

基金项目:国家自然科学基金(No. 60177013)资助

第一作者:刘鹏(1980-),男,博士研究生,主要研究方向为光学工程. Email:lpeng@zju.edu.cn

导师(通讯作者):余飞鸿(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为光学工程与智能化光学仪器. Email:feihong@zju.edu.cn

收稿日期:2016-11-29;录用日期:2017-01-20

<http://www.photon.ac.cn>

designed and fabricated to verify the correctness and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** Fly-eyes lens; Multi-configuration imaging; Illumination; LCoS; LED

**OCIS Codes:** 220.4830; 220.2740; 080.1510; 080.1753; 080.2740; 080.3620; 080.3685; 350.4600

## 0 引言

反射型彩色滤光片硅基液晶技术(Color-filter Liquid Crystal on Silicon, CF-LCoS)为一种层叠式结构,原理是将驱动液晶的像素集成在硅片上,然后再在硅基芯片上镀制反射层,封装液晶盒子,最后在液晶盒上表面玻璃内层加上 RGB 滤色片掩膜<sup>[1-2]</sup>. CF-LCoS 显示尺寸小,开口率高,而且可直接用白光照明实现彩色显示,可广泛用作微型投影系统以及可穿戴设备的投影源。

早期液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)或数字光学处理器(Digital Light Processing, DLP)投影仪均采用超高性能灯泡(Ultra High Performance, UHP)光源,其响应速度慢、体积笨重,而且功耗和发热量都相当大,这些都和微型投影要求相违背.相比较而言,白光 LED 光源由于其在能量转化效率,长工作寿命、更宽广色域、高稳定性与安全等方面对于传统光源有着明显的优势而成为 CF-LCoS 微型投影仪光源的最优选择.在 CF-LCoS 微型投影领域,本课题组对运用曲面斜率角控制的照明反射器优化设计<sup>[3-7]</sup>,自由曲面矩形光斑照明系统设计方法<sup>[8]</sup>,方棒的复眼等效照明分析及其偏振复用实现<sup>[9-10]</sup>等多个方面均进行了广泛的研究.上述研究分别存在着照明光斑为圆形,利用率不高<sup>[3-7]</sup>;均匀性不够,照明角度控制不易到位,加工困难<sup>[8]</sup>;方棒与 LED 耦合组装困难,结构偏大<sup>[9-10]</sup>等问题。

复眼是获取均匀照明的有效方法,在半导体制造,指纹检测,显微镜照明以及投影显示等领域有着广泛的应用<sup>[11-12]</sup>.在双排复眼照明系统中,每排复眼透镜由一系列小透镜组成.光源发出的光线经冷抛物反光碗反射后投射在前排复眼透镜上,它将整个宽光束分割成若干细光束,每个透镜单元可将光源成像到后排透镜阵列上相应的透镜单元中心,形成一个具有同样数量的虚光源阵列,相当于把一个光源分为了多个子光源来照明.后排透镜阵列放置在前排透镜的焦平面上,类似场镜,可收紧光束角度.复眼每个小透镜将相对应的前排透镜重叠成像于无穷远.准直透镜把后排复眼透镜成像于投影物镜出瞳处(无穷远处),形成柯拉照明.系统中,每个细光束均匀性优于整个宽光束均匀性,且对称位置上的细光束光斑相互叠加,进一步提高了照明均匀性<sup>[13-14]</sup>.但目前的复眼照明对光源入射角度都比较小,一般在  $5^\circ$  左右<sup>[15]</sup>.大角度适用于 LED 照明的微型投影用的复眼系统,并没有太多的报道。

采用复眼可以解决圆形光斑与方形光斑转换问题,但传统投影复眼照明系统中照明复眼的光斑尺寸相对较大,入射到复眼面上角度可以控制得比较小,设计难度不大.在传统的计算方法中,根据几何光学原理,利用中心和边缘光线追踪法可以计算给出复眼系统的参量,再利用非成像光学方法进行光线追迹<sup>[16-17]</sup>,大角度的光线进入复眼后会带来能量损失,如何平衡复眼系统的集光效率、照明均匀性以及尺寸之间的关系,是一项非常有挑战性的工作。

本文根据 LED 发光以及 CF-LCoS 微型投影系统的特性,采用反向原理导出了复眼照明系统的基本成像公式,在此基础上确定了 LED 复眼照明系统的初始结构,之后利用复眼照明系统中的多重共轭成像关系,将复眼成像,中继透镜成像分别优化,最后在成像设计软件中将两者通过孔径与中间像匹配原理进行组合,成功设计了大照明角度、小照明光斑下的 CF-LCoS 复眼照明系统,以较小的复眼数,在保证 CF-LCoS 照明要求的情况下,很好地解决了照明系统效率同大角度的问题,同时实现了圆形光斑转换为矩形光斑的问题。

## 1 大入射角度小入射光斑复眼计算理论

图 1 中复眼透镜为一正方形,为尽可能提高系统集光效率,其边长为圆形照明光斑的直径  $H$  应保证圆形光斑全部在正方形复眼范围内, $h_x, h_y$  表示子眼在两个方向的高度; $N_x, N_y$  是复眼子眼在两个方向的数目; $u_x, u_y$  是子眼光束最大出射角; $f'_e$  为子眼焦距; $f'_r$  为中继透镜的焦距; $v_x, v_y$  是目标面上光线的最大入射角; $S_x, S_y$  是目标面或投影源的高度与长度.从图 1 可以导出复眼尺寸,子眼尺寸以及子眼数目在  $(x, y)$  坐标方向的关系为

$$\begin{cases} H = N_x \times h_x \\ H = N_y \times h_y \end{cases} \quad (1)$$

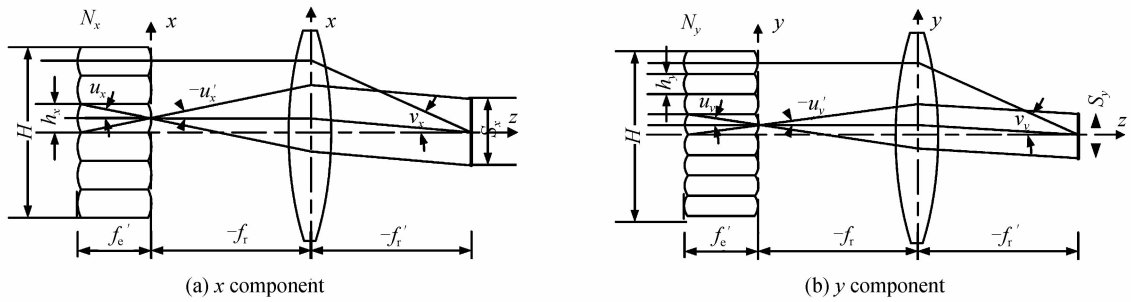


图 1 复眼系统的照明原理图

Fig. 1 The illumination principle of the fly-eyes lens system

通常来说,子眼数目越多,系统的照明均匀性越好.但对 CF-LCoS 微型投影系统,本身尺寸已经相当小,由于加工工艺的限制(前期加工刀具尺寸的限制,后期开模模具突出部分随着冲压存在慢慢磨损问题),子眼不可能做到很小,所以子眼数目存在一个加工工艺的限制值.

其次,子眼上的最大出射角和子眼高度及其焦距之间存在的关系为

$$\begin{cases} \tan(u_x) = \frac{h_x}{2f_e} \\ \tan(u_y) = \frac{h_y}{2f_e} \end{cases} \quad (2)$$

另外,子眼上的最大出射角还存在式(3)的关系

$$\begin{cases} \tan(-u'_x) = \frac{S_x}{2f'_r} & n \sin(u_x) = \sin(-u'_x) \\ \tan(-u'_y) = \frac{S_y}{2f'_r} & n \sin(u_y) = \sin(-u'_y) \end{cases} \quad (3)$$

根据式(2)同式(3)的关系,得到子眼在两个方向尺寸同 CF-LCoS 投影源两个方向尺寸关系为

$$\begin{cases} h_x \approx n \frac{f'_e}{f'_r} S_x = \frac{S_x}{M} \\ h_y \approx n \frac{f'_e}{f'_r} S_y = \frac{S_y}{M} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $M$  为复眼中继系统的放大率,表示 CF-LCoS 芯片在两个方向的尺寸与子眼在两个方向的尺寸之比,在计算过程中考虑了小角度情况下,角度的  $\sin$  同  $\tan$  基本上相等的近似条件.最后,目标面上的最大入射角和复眼透镜高度以及中继系统的焦距关系为

$$\begin{cases} \tan(\nu_x) = \frac{(N_x - 1)h_x}{2f'_r} = \frac{H(1 - 1/N_x)}{2f'_r} \\ \tan(\nu_y) = \frac{(N_y - 1)h_y}{2f'_r} = \frac{H(1 - 1/N_y)}{2f'_r} \end{cases} \quad (5)$$

一般地,子眼可以认为是一个折射率为  $n$ ,前表面半径为  $r_1$ ,后表面半径为  $-r_1$  单透镜,后表面仅起场镜作用,设计时可以先不考虑,对大入射角,子眼的焦距和其面形间关系如图 2.

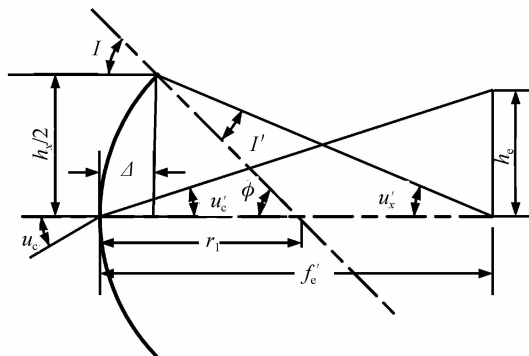


图 2 子眼焦距求解示意图

Fig. 2 The sub fly-eye configuration for the focal length

考虑子眼边上的边缘光线,由图 2 导出焦距存在式(6)~(8)关系

$$f'_e = r_1 \left( 1 + \frac{\sin I'}{\sin u'_x} \right) \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sin I' = \frac{h_x}{2nr_1} \\ \sin u'_x = \frac{h_x}{2\sqrt{(f'_e - \Delta)^2 + h_x^2/4}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta = r_1 - \sqrt{r_1^2 - h_x^2/4} \quad (8)$$

式(6)~(8)中,子眼曲率半径为  $r_1$ ,折射率为  $n$ ,子眼焦距为  $f'_e$ ,  $u_c$ 、 $-u'_c$  为入射到子眼第一面主光线入射角和折射角,其在焦面的高度为  $h_e$ ,决定像斑的大小. $h_x/2$  为子眼在  $x$  方向尺寸或口径, $\varphi$  为该高度法线与光轴的夹角, $I$  与  $I'$  为子眼边缘  $h_x/2$  高度处平行光线入射角同折射角, $u'_x$  为该光线在焦面同光轴的夹角, $\Delta$  为该高度光线的矢高.假定式中的  $\Delta$  近似为 0,则联立式(6),(7)与(8)可得子眼的前表面半径为

$$r_1 = \frac{f'_e \pm \sqrt{f_e'^2 + h_x^2/4}}{n} \quad (9)$$

式中  $r_1$  代表子眼第一面的半径,考虑到对称性,  $-r_2 = r_1$ . 由图 2 得到子眼最大入射角主光线  $C$  形成的理想像高为

$$h_e = f'_e \tan(-u'_c) \approx n f'_e \tan u_c \quad (10)$$

根据上面的理论,复眼照明系统初始结构的计算方法为:第一步:给定系统中投影源(CF-LCoS)的大小  $S_x, S_y$  以及投影源面的允许最大入射角  $v_x, v_y$ ;第二步:根据前端 LED 准直光斑尺寸  $H$ ,确定复眼尺寸为光斑直径  $H$  的外切正方形;第三步:根据系统均匀性要求以及式(1)和式(4),确定复眼的数目  $N_x, N_y$  以及子眼在两个方向尺寸  $h_x, h_y$ ;第四步:根据式(3)计算中继系统的焦距  $f'_r$ ;第五步:根据式(3)计算子眼最大出射角  $u_x, u_y$ ;第六步:根据式(4)计算子眼的焦距  $f'_e$ ;第七步:根据式(6)计算子眼第一面半径  $r_1$ ;第八步:用成像光学软件优化子眼同中继透镜;第九步:构建复眼+中断透镜阵列,并进一步优化;第十步:用非成像光学软件验证成像结构构建的复眼系统的正确性.

## 2 复眼成像的分步共轭成像优化

为了验证理论的正确性,给出一个设计实例,CF-LCoS 参量如表 1,目标照明面 CF-LCoS 尺寸为  $5.7 \text{ mm} \times 4.3 \text{ mm}$ ,CF-LCoS 允许的最大入射角为  $15^\circ \sim 20^\circ$ . 照明光源为单位光学扩展量的光源,入射到复眼的最大角度为  $12^\circ$  的圆形光斑,其直径为  $6.6 \text{ mm}$ . 考虑到微型投影尺寸限制,式(1)中复眼在两个方向的个数取  $N_x : N_y = 6 : 8$ . 根据前述理论设计的复眼系统参量如表 2.

表 1 CF-LCoS 芯片参量

Table 1 Parameters of the CF-LCoS chip

CF-LCoS model	Size/diagonal	Resolution	Pixel size	Length/width	Reflectivity	Display mode
HX70333	0.28"	320×240	8 $\mu\text{m}$ ×8 $\mu\text{m}$	4 : 3	24%	CF

表 2 复眼参量的理论计算表

Table 2 Theoretical calculation table of the fly-eyes lens system's parameters

	$I$	$H$	$S_x : S_y$	$N_x : N_y$	$h_x : h_y$	$f'_r/\text{mm}$	$f'_e(n)$	$r_1(n)/\text{mm}$
Sample	12	6.6	5.7 : 4.3	6 : 8	1.1 : 0.69(8 : 6)	10.775	1.39~1.23	1.9~1.51(1.5~1.7)

对子眼优化的目标如图 3,优化目标是希望大角度的光线完全通过子眼,另外由于子眼是一个小长方形,最后希望照明光束在子眼后像斑为  $1.2 \text{ mm}$  直径圆形光斑.

图 4 为子眼光线结构图.子眼光斑选用光斑大小为  $1.375 \text{ mm}$  的圆(子眼的对角线尺寸),入瞳口径设为  $\text{EPD}=1.375 \text{ mm}$ .最大入射半视场角为  $12^\circ$ .光线经过复眼会聚的像斑控制为直径  $1.2 \text{ mm}$  的圆,以保证所有大角度光线通过而不会与边缘相交.

从图 4 的优化结果看出,最大视场角的光线很好地通过了系统,其中子眼在  $x$  方向的最大会聚角为  $23.4^\circ$ (子眼内),子眼在空气中的最大出射角为  $40.8^\circ$ .子眼的焦距为  $2.08 \text{ mm}$ ,最大视场角像高为  $0.6 \text{ mm}$ .透镜材料的折射率为  $n=1.743972$ .

将子眼的第二面加入后的优化光线结果如图 5. 从图 5 发现,子眼后面面形的加入,起到了很好地抑制轴外视场光线角度的作用,大大减少轴外光线的发散角. 这时轴上子眼出射角仍然在  $40.7^\circ$  左右. 加上子眼后表面后子眼焦距仍然为 2.08 mm.

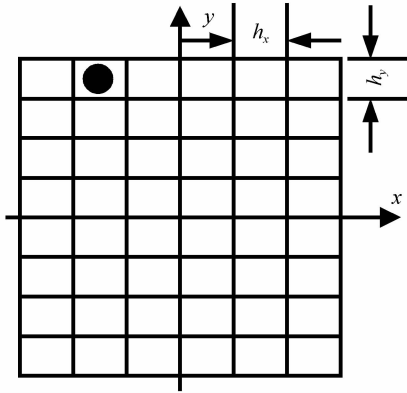


图 3 复眼子眼优化目标示意图  
Fig. 3 The optimization target of the fly-eye spot

将子眼出射的尺寸为 1.2 mm 的光斑,通过中继透镜成像到 CF-LCoS 面,形成像高为 3.5 mm 的均匀照明( $x$  方向,尺寸为  $\sqrt{S_x^2 + S_y^2}/2 = 3.57$  mm). 这里考虑偏振分束器(Polarization Beam Spiliter, PBS)(9.5 mm×9.5 mm×7 mm,材料为 ZF7)以及 CF-LCoS 前表面的保护玻璃(厚度为 0.3 mm,材料为 HOYA 的 BSC7),设计结果如图 6 所示.

中继透镜的焦距为 10.53 mm,入射到 CF-LCoS 表面的角度为  $15^\circ$ .

由子眼构建复眼,并同中继透镜进行合成,最后效果如图 7. 图 7(a)为  $x-z$  平面在成像光学中的光束结构图,图 7(b)为  $y-z$  平面在成像光学中的光束结构图. 可以发现,在两个方向的尺寸基本达到了设计要求.

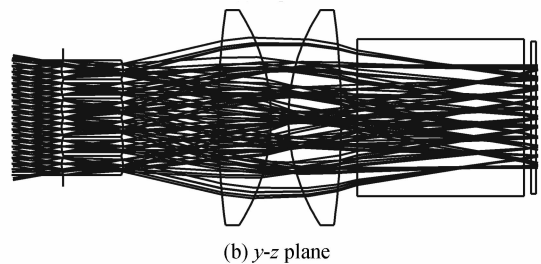
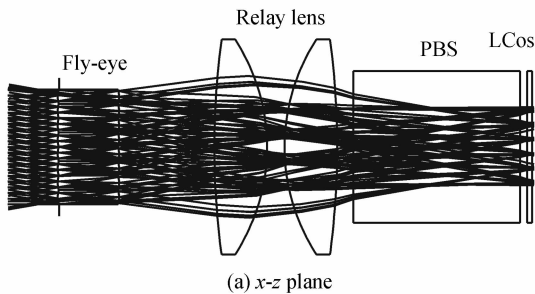


图 7 复眼+中继系统+PBS 在两个方向光线结构示意图  
Fig. 7 The ray fan of the Fly-eye+Relay system +PBS system in the 2 planes

根据以上的设计结果,在照明仿真软件中进行建模仿真,在准直透镜的前端定义一个光源文件(采用实际的 Cree XPE 光源,利用 500K 光线包进行模拟). 光线在  $y-z$  方向的光路图如图 8 所示(采用实际的 Cree XPE 光源,利用 500K 光线包进行模拟). 在非成像光学模拟时,为验证复眼的光能收集能力,复眼上下左右分别向外扩展两排.

在仿真系统中建立了一个虚拟面来观察复眼出射面的光斑情况,从图 9 中发现,所有的复眼子眼面光线

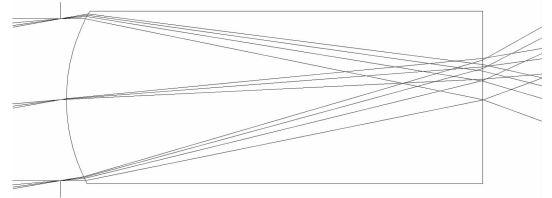


图 4 复眼子眼优化以后的光线结构图  
Fig. 4 The light structure of the sub-fly-eyes after being optimized

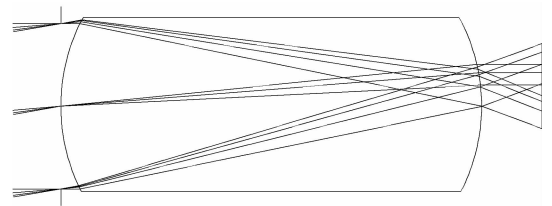


图 5 子眼整体光束结构图  
Fig. 5 The light structure of the sub-fly-eyes imaging with the rear surface added

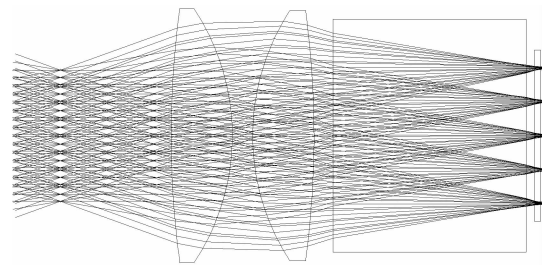


图 6 中继透镜优化效果示意图  
Fig. 6 The optimization result of the relay lens

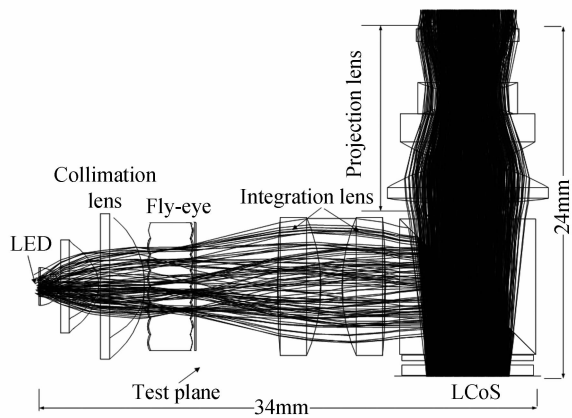


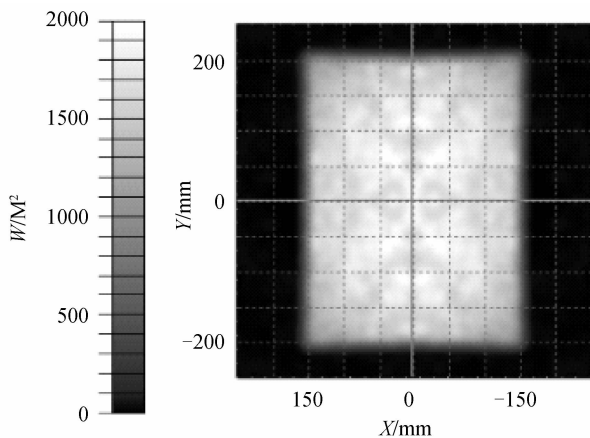
图 8 非成像光学软件仿真复眼+镜头的  $y-z$  平面光线图

Fig. 8 The fly-eye plus the imaging system in the  $y-z$  plane 完全布满,相对于小入射角的光线,大入射角的光线会在子眼出射面形成更大像斑,如果设计不好,会使大角度光线跨过当前子眼进入相邻子眼,导致这部份光线无法形成有效照明,但是本设计中,并没有这种现象发生.

由图 9 不难发现,从圆面转换为均匀方形照明面的能量转换效率高达 95%,这进一步证明本文设计的系统对大角度光线通过性优于传统的复眼系统设计方法.

图 10 给出了 CF-LCoS 面上入射光线的角度分布图,可以看到大部份光线集中在  $15^\circ$  以内,只有边角很少部份光线在  $15^\circ \sim 20^\circ$  之间.

进一步观察屏幕上的光强分布,如图 11 所示,整个目标上集中了 9.2% 的光线,均匀性相当好.



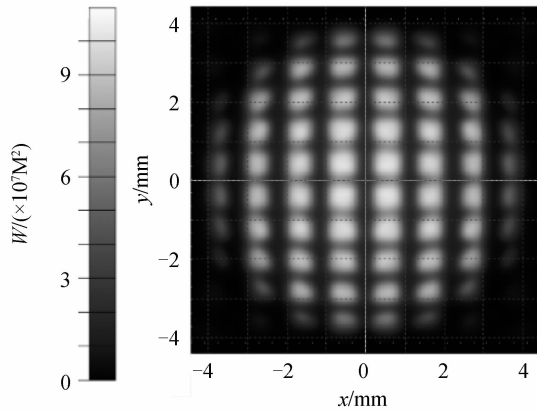
Min: 0.00067, Max: 1995.50, Ave: 807.13  
Total flux: 2172lm, Flux/emitted Flux: 0.092, 40106 Incident rays

图 11 屏幕面光线追迹结果

Fig. 11 The irradiance map on the screen

利用上述优化法,基于 0.28 英寸的 CF-LCoS 芯片设计并制作了实验样机.

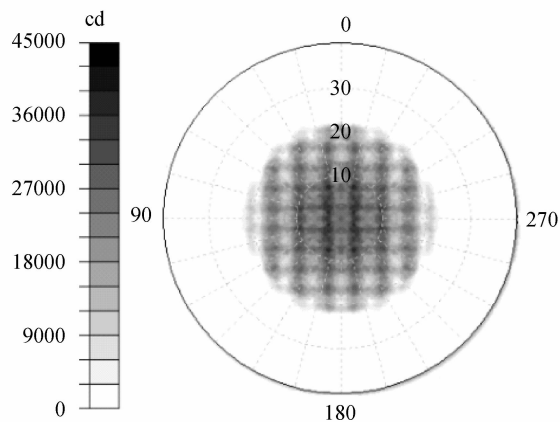
透镜设计条件为:工作波段为 d、F、C 三色光;像高设置为 0.00 mm、1.00 mm、1.80 mm、3.00 mm 和 3.70 mm;物距 0.50 m、1.00 m 和 2.00 m,对应放大率分别为  $41.2\times$ 、 $86.9\times$  和  $163.4\times$ ; CF-LCoS 尺寸为



Min: 680.85, Max:  $1.01 \times 10^8$ , Ave:  $2.89 \times 10^7$   
Total flux: 22497lm, Flux/emitted flux: 0.95, 146370 incident rays

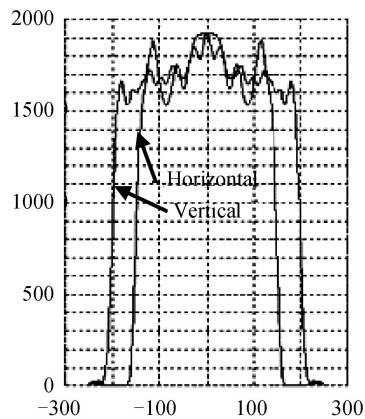
图 9 复眼后表面光线点列图

Fig. 9 The spot diagram near the fly-eye



Min: 0cd, Max: 42827 cd, Total flux 8303.7lm 71641 Rays  
Data Covers  $\pm 40.00^\circ$  from normal

图 10 极坐标下的 CF-LCoS 面上的入射角度分布  
Fig. 10 The polar Iso-Candela on the CF-LCoS plane



Min: 0.00067, Max: 1995.50, Ave: 807.13

Total flux: 2172lm, Flux/emitted Flux: 0.092, 40106 Incident rays

图 11 屏幕面光线追迹结果

Fig. 11 The irradiance map on the screen

利用上述优化法,基于 0.28 英寸的 CF-LCoS 芯片设计并制作了实验样机.

透镜设计条件为:工作波段为 d、F、C 三色光;像高设置为 0.00 mm、1.00 mm、1.80 mm、3.00 mm 和 3.70 mm;物距 0.50 m、1.00 m 和 2.00 m,对应放大率分别为  $41.2\times$ 、 $86.9\times$  和  $163.4\times$ ; CF-LCoS 尺寸为

5.7 mm×4.3 mm,像素大小为 $8\ \mu\text{m}\times 8\ \mu\text{m}$ ,对角线长 $0.28''$ ,MTF 最大截止频率根据像素尺寸计算约为 66 cyc/mm.

图 12 给出系统的实物图,整个结构基本上同理论设计完全一样.

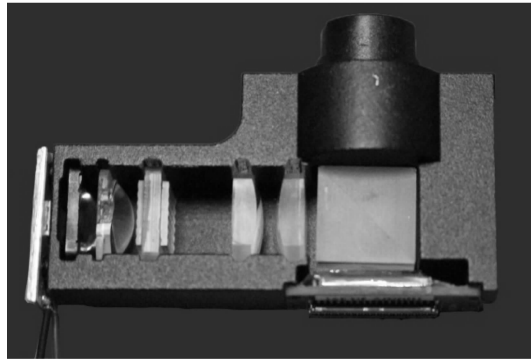


图 12 CF-LCoS 微型投影样机

Fig. 12 The real designed CF-LCoS projector

图 13(a)为样机投影的白板图像,在灰阶 255 情况下的实测亮度为 9.2 lm/W,均匀性由九点法给出,即将图像平均划分为 9 个区域,其中 1~9 点分别为 9 个区域的中心点位置.使用 XYI-III 光照度计,在光引擎投影模式为白态投影时测量(探头平贴屏幕表面)1~9 测试点的照度值  $L_{w1}\cdots L_{w9}$  (以勒克斯 lx 表示),均匀性定义为  $\text{Min}(L_{w1}\cdots L_{w9})/\text{Average}(L_{w1}\cdots L_{w9})$ .通过 9 点法测量其均匀性 94%.从样机测量结果验证了上述优化设计方法的正确性以及设计的简便性.

通过与 LED 准直直接照明的光引擎结构及其投影效果对比不难发现<sup>[4-8]</sup>,直接照明尽管体积小巧,便于微型投影微型化,但由于大角度 LED 光经过的荧光粉路径增加,投影出的白板边缘有明显的泛黄现象存在.LED 准直照明非复眼系统中心色温在(0.33,0.33),边角会偏到(0.5,0.3)左右.而在图 13(a)中,由于 LED 每一个角度发出的光,均到达了投影屏幕,泛黄现象基本不存在,整个屏幕色温保持在(0.32,0.32)~(0.35,0.35)区间范围内.图 13(b)给出了网络投影效果图,从该网格投影图不难发现,投影出的网格畸变也控制得相当好,同时黑白过渡也相当锐利,证明投影光学系统成像效果良好.

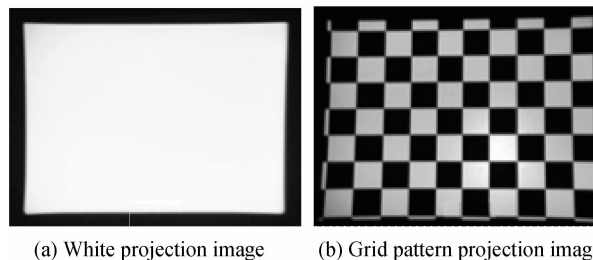


图 13 复眼照明情况下的空白投影与网格投影效果图

Fig. 13 The white+grid projection result with the fly-eye illumination system

### 3 结论

本文提出了一种基于成像光学设计软件的复眼照明系统优化方法.在分析复眼照明系统原理的基础上,提出了复眼子眼第一面与目标面间的多重共轭成像关系.利用成像设计软件中的多重配置,多重共轭成像关系可以直接在光学设计软件中建立模型,然后进行复眼照明系统优化直接得到复眼及其中继系统的全部参量.模拟结果表明本文提出的方法可以更简洁精确地给出复眼系统.相比于传统的非成像光学模拟方法,本文提出的方法可以快速给出不同光源角度的照明系统,具有更高的效率.利用该方法设计制作了 CF-LCoS 芯片样机,实验证明了该方法的有效性.

#### 参考文献

- [1] JOHNSON KM. Smart spatial light modulators using liquid crystals on silicon[J]. *IEEE Journal of Quant Electron*, 1993,29(2): 699-703.
- [2] HUANG H C, CHENG P W, YIP W C, *et al.* AMLCD on a silicon substrate with integrated digital data driver[C].

- Asia Display, 1995, 481-484.
- [3] ZHANG Wen-zi, LIU Qin-xiao, GAO Hui-fang, *et al.* Free form reflector optimization for general lighting[J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(6): 063003.
- [4] CHEN En-guo, LIU Peng, YU Fei-hong. Optical design of single plano-convex freeform lens-based illumination system for color filter liquid crystal on silicon pico projectors[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(03): 0330021-0330029.
- [5] CHEN En-guo, YU Fei-hong. Optimization design of single freeform lens based illumination system for CF-LCoS handheld pico-projectors[J]. *Optik*, 2013, **124**(14): 1912-1916.
- [6] CHEN En-guo, LIU Peng, YU Fei-hong. Synchronized parameter optimization of the double freeform lenses illumination system used for the CF-LCoS pico-projectors[J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, **44**(7): 2080-2087.
- [7] CHEN En-guo, YU Fei-hong. Design of an elliptic spot illumination system in LED-based color filter-liquid-crystal-on-silicon pico projectors for mobile embedded projection[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(16): 3162-3170.
- [8] LIU Zhen-jie, YU Fei-hong. Non-uniform grid target tessellation method for the design of lens group with rectangular uniform illumination[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(7): 1618-1624.
- [9] ZHANG Qian, LIU Zhen-jie, ZHANG Wen-zi, *et al.* Polarization recycling method for light-pipe-based optical engine [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(36): 8827-8833.
- [10] QIU Su, NI Yu, JIN Wei-qi, *et al.* FOV modeling of multi-aperture superposition compound eye based on micro-surface fiber faceplate[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(11): 3018-3025.  
裘溯, 倪宇, 金伟其, 等. 基于微端面光纤面板的多孔径视场重叠复眼的视场模型[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(11): 3018-3025.
- [11] DICKEY F M, HOLSWADE S C. Laser beam shaping theory and techniques[M]. New York: Marcel Dekker; 2000, 45-60.
- [12] WANG L R, RANIA H, ABD E M, *et al.* Illumination scheme for high contrast, contactless fingerprint images[C]. SPIE, 2009, **7429**: 742911.
- [13] BART V G, YOURI M, HUGO T. Using a fly's eyes integrator in efficient illumination engines with multiple light-emitting diode light sources[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(4): 043001.
- [14] ZHOU Shu-wen, LIN Jin-bo. Uniformity of the illuminative system with fly's eyes lens[J]. *Journal of Zhejiang University*, 1986, **5**(20): 130-136.  
周淑文, 林金波. 复眼透镜照明系统的均匀性[J], 浙江大学学报, 1986, **5**(20): 130-136.
- [15] ZHOU Ping, LU Wei, LIN Yu-xiang, *et al.* Fly eyes lens array used in liquid crystal projection display with high light efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 587-591  
周平, 陆巍, 林宇翔, 等. 复眼透镜提高液晶投影照明系统的能量利用率[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 587-591.
- [16] LU Wei. Theory and experimental research on the projection system illumination[D]. Zhejiang University, 2006:50-100  
陆巍. 投影显示照明光学的理论和实验研究[D]. 浙江大学, 2006:50-100.
- [17] ZHANG Zhen-rong. Theory and application research of liquid crystal projection display optical system[D]. Zhejiang University, 1999: 30-90.  
郑臻荣. 液晶投影显示光学系统的理论分析与应用研究[D]. 浙江大学, 1999: 30-90.