

文章编号 1004-924X(2018)01-0062-08

LED 和梯度折射率透镜投影系统光路设计

朱向冰*, 钱立勇, 陈 瑾, 崔海田, 王元航

- (1. 安徽师范大学 光电技术研究中心, 安徽 芜湖 241000;
2. 安徽省光电材料科学与技术重点实验室, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 现有的数字光处理投影(DLP)系统采用色轮和中继透镜等元器件, 由此导致投影系统结构复杂。针对现有技术的缺陷, 本文设计了一种以三色 LED 作为照明光源, 以梯度折射率透镜形成平行光的新型 DLP 投影系统。和传统的投影系统相比, 减少了色轮、中继透镜、反射镜等元器件, 简化了光学系统的结构。借助于 Tracepro 软件进行了模拟与仿真, 对光线追迹的结果进行分析, 分析得到整个投影系统的光斑均匀性为 96.9%。结果表明本设计使投影系统的光路得到了简化, 光斑的均匀性也得到了改善。本设计只需要选择合适的投影镜头, 就可以消除 LED 面光源宽度过大对投影光斑的影响。

关键词: 光学设计; 投影仪; 梯度折射率透镜; 发光二极管

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182601.0062

Optical path design of LED and GRIN lens projection system

ZHU Xiang-bing*, QIAN Li-yong, CHEN Jin, CUI Hai-tian, WANG Yuan-hang

- (1. Optoelectronic Technology Research Center,
Anhui Normal University, Wuhu 241000, China;
 2. Anhui Province Key Laboratory of Optoelectric Materials
Science and Technology, Wuhu 241000, China)
- * Corresponding author, E-mail: asd05tx@126.com

Abstract: The existing Digital Light Projection (DLP) systems, in which the components such as color wheel and relay lens are used, resulting in a complex projection system. Aiming at this deflection, a new DLP projection system was designed, where the three-color LED were used as the illumination light source and refractive index lens were used to produce the parallel light. Compared with the conventional projection system, components such as the color wheel, the relay lens, the mirror could be saved. Besides, the structure of the optical system was simplified. The simulation results and ray tracing by the Tracepro software show that the light spot uniformity reaches 96.9%. The results indicate that optical path of the projection system is simplified, and uniformity of the spot is also improved. The design only need to select the appropriate projection lens, that it can eliminate the influence of extended LED on the projection spot.

Key words: optical design; projector; gradient refractive index lens; Light-emitting Diode (LED)

收稿日期: 2017-03-24; 修订日期: 2017-05-16.

基金项目: 安徽省科技攻关项目(No. 1301022058); 安徽省高校质量工程项目(No. 2015gxxk011)

1 引言

发光二极管具有响应速度快、体积小、低功耗、寿命长等特点^[1-2],通过控制三色 LED 发出的光强,可在投影、显示等方面为观众提供丰富的颜色信息^[3-4]。作为新型固体光源,LED 依然是投影机的主要照明光源^[5-7]。

投影产品将继续向高亮度、高分辨率、大屏幕、轻小、超薄和便捷化发展。传统的数字光处理投影系统(Digital Light Processing,DLP)采用色轮、中继透镜等元器件,导致投影系统体积较大。传统的单片式 DLP 投影系统具有一个照明光路和一个投影光路,包括光源、反光碗、色轮、导光管、中继透镜、反射镜、DMD、吸收体和投影透镜^[8]。当光线经过扇形滤光片的色轮时,一束白光被分成 RGB 三色,然后与导光管耦合,经过中继透镜,在反射镜上改变一次光路方向,到达 DMD,DMD 元件通过二进制脉宽调制技术能精确控制每个像素的灰度等级^[9]。一方面,色轮对光能的损耗较为严重,为了提高系统的亮度,必须要加大发光功率,从而导致整个投影系统的温度升高,影响整个投影系统的散热,并且色轮以及驱动色轮高速旋转电机的使用,使系统的可靠性下降;另一方面,光线经过中继透镜时其均匀性也受到一定的影响。

目前,关于 DLP 投影系统已经有大量研究。吕伟振等人设计了一种新型折反射式超薄投影成像系统,该系统达到了超薄化、低成本、小型批量化生产等设计要求^[10]。Dawei Rui 等人提出了一种基于渐变折射率透镜和激光的投影照明光路设计,利用激光作为照明光源,提高了光的利用率,并且减小了光路的体积^[11]。赵星等人提出了一种微型投影机光学引擎,采用红绿蓝三色大功率高亮度发光二极管作为光源,使用 X 棱镜作为合色元件,满足了微型投影机的设计要求^[12]。本文主要从 DLP 投影技术出发,利用 LED 体积小、耗能低、亮度高、热量少等优点,结合梯度折射率透镜具有连续变化的介质折射率特性,对投影系统的光路进行了改进和简化。

2 光路设计

传统的单片式投影系统如图 1 所示。为了完

善上面所提到的这些缺陷,本文设计了一种新颖的投影系统,如图 2 所示,该系统包括 LED 阵列、梯度折射率透镜、数字微镜元件、投影透镜和吸收体。该投影系统使用三色 LED 组成的阵列作为光源,使用梯度折射率透镜代替传统投影系统中的导光管、中继透镜、反射镜,每一颗 LED 单独与梯度折射率透镜耦合,提高了光斑的均匀性。同时,由于选择了三基色 LED 而无需采用色轮分光,从而避免了色轮造成的光利用率下降,并降低了系统的散热难度。

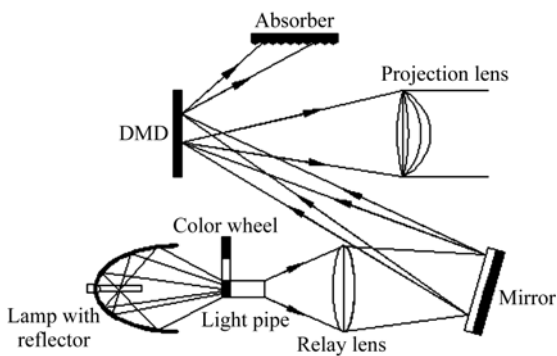


图 1 传统单片式 DLP 投影系统光路图

Fig. 1 Optical structure of single-piece micro DLP projection system

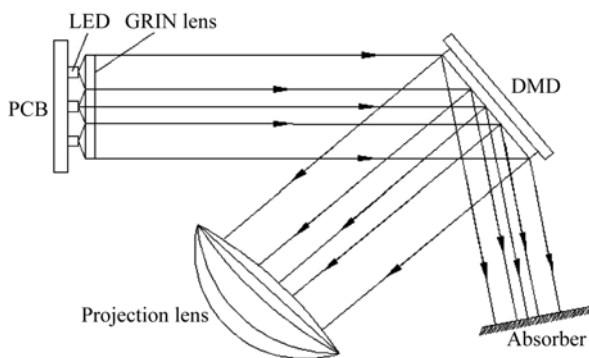


图 2 光学设计方案

Fig. 2 Optical design

2.1 DMD 芯片的选择

数字微镜元件(Digital Micromirror Device, DMD)由高速数字式光反射开关阵列组成,它在一个芯片上集成了大量的微镜,每个微镜可独立高频翻转在正反两个位置,每个微镜对应一个像素^[13]。根据本设计的需要,选择 dlp6500 型 DMD 芯片,光学参数如表 1 所示,该芯片的翻转角度是 $\pm 12^\circ$,芯片表面的所有微型反射镜组成的阵列长宽是 $14.5152 \text{ mm} \times 8.1648 \text{ mm}$ (16 : 9)。

表 1 dlp6500 型 DMD 芯片参数

Tab. 1 Parameters of dlp6500 type DMD chip

参数	数值
Chip size/cm	1.651 cm (0.65 inch)
Micromirror pitch/ μm	7.56
Tilt angle/ $^\circ$	± 12
Length to width/mm	14.515 2 \times 8.164 8 (16:9)
Reflectivity/%	88

2.2 光源设计

本文使用的是 Cree 公司 CLMUC-FKA 型号的 LED 灯珠,该灯珠是高亮度、宽视角的全彩色 LED,并且封装尺寸较小,只有 1.5 mm \times 1.5 mm \times 1.0 mm,适用于高分辨率的投影系统和室内视频画面、装饰照明等领域。每颗 LED 灯珠内部有三个独立的小 LED,共有四个引脚,其中一个公共引脚接正电压,其它三个引脚分别对应红绿蓝三色光,通过控制红、绿、蓝三个引脚的电流分别控制三种颜色的发光强度。发光波长分别是:Red(619~624 nm),Green(520~535 nm),Blue(460~475 nm);在电流为 5 mA 时发光强度分别为:Red(36~71 mcd),Green(112~280 mcd),Blue(18~45 mcd)。

在本设计中,光源需要与 DMD 匹配。在图 2 中,当光线入射到 DMD 表面时,由于 DMD 表面的微镜翻转 12°,被微镜反射后入射到投影透镜上的光线几乎垂直于 DMD 表面,因此入射光与 DMD 表面法线之间的角度约为 24°,根据 DMD 的尺寸可以算出入射光斑的大小。为了满足 DMD 表面 16:9 的尺寸结构,将 LED 阵列设计成 5 行 3 列。由于 LED 的发光角度较大,所以 LED 发出的光线必然会倾斜入射到其它透镜上,所以采用吸收装置把每一颗 LED 灯珠分隔开,如图 3 所示。整个 LED 灯珠面阵列的尺寸是 14 mm \times 8.4 mm,图中每个区域的尺寸是 2.8 mm \times 2.8 mm,相邻 LED 灯珠之间的间距是 1.4 mm,在每颗 LED 灯珠的表面自带了一个直径为 1 mm 的半球形透镜,每颗灯珠内部封装的红、绿、蓝三颗小 LED 都集中在球型透镜正下方的中心处,相邻红色小 LED 之间的距离约为 2.7 mm。

根据厂家提供的资料,红色小 LED 的最大功耗为 60 mW,PN 结相对于环境的导热系数为

460 $^\circ\text{C}/\text{W}$,在最大功耗下其温升为 27.6 $^\circ\text{C}$,PN 结的最大结温为 110 $^\circ\text{C}$,所以只要环境温度不超过 80 $^\circ\text{C}$,红色 LED 就能在最大功耗下工作。同理绿色和蓝色 LED 以最大功耗工作时,需要保证环境温度不超过 80 $^\circ\text{C}$ 。当三颗小 LED 同时以最大功耗工作时要保证环境温度不超过 28.5 $^\circ\text{C}$ 。图 3 中,每颗灯珠的最大功耗为 158 mW,15 颗灯珠的总功耗为 2.37 W,采用半导体制冷的方式可以保证 LED 贴附的基板温度低于 10 $^\circ\text{C}$ 。

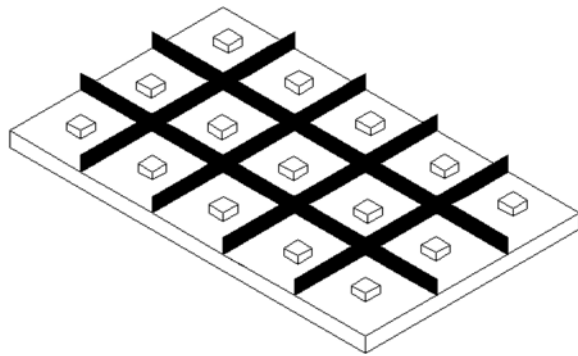


图 3 LED 面阵列

Fig. 3 LED surface array

如果入射到 DMD 上的光线发散角度较大,不仅会造成杂散光,还会破坏有效投影面积的照度均匀性。因此有必要将投射到 DMD 上的光线进行准直,准直后投射的光斑均匀性和杂散光数量会得到很大程度的改善。

2.3 梯度折射率透镜

2.3.1 梯度折射率透镜理论介绍

本文采用梯度折射率透镜改善入射到 DMD 表面的光线角度,这种梯度折射率透镜又称为自聚焦透镜。该透镜的折射率沿径向变化,分布函数满足平方律(抛物线)的形式:

$$n(r) = n_0 \left[1 - \frac{1}{2} (\alpha r)^2 \right], \quad (1)$$

其中: α 是介质折射率的渐变系数, n_0 是轴心折射率。目前,常见的梯度折射率透镜的轴心折射率 n_0 近似为 1.59~1.60。光在折射率逐渐降低的薄层中传输时,基于折射原理向中心自动偏转,因此其轨迹呈正弦曲线。一个周期正弦曲线的光学长度为 P ,可知: $P = 2\pi/\alpha$,当点光源置于长度 $l = P/4 = \pi/2\alpha$ 的透镜输入端面的光轴处时,透镜可以出射平行光^[11]。如图 4 所示,用 Zemax 软件模拟了 $\frac{P}{4}$ 长度的梯度折射率透镜中的光线分布。

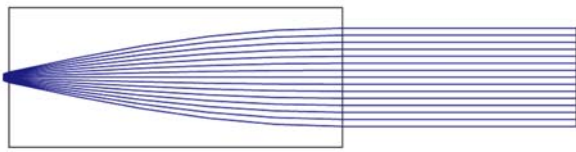


图 4 Zemax 模拟的 GRIN 透镜光线分布

Fig. 4 Beam distribution of GRIN lens simulated by Zemax

图 4 中入射光的角度较小,从 Zemax 模拟图中可以明显看到光线经过梯度折射率透镜后近似以平行光形式出射,但是实际上本文使用的是 LED 光源,LED 光源的发光角度较大,在近场情况下不宜将 LED 当作点光源处理。为了改善实际应用中的效果,在梯度折射率透镜的入射端面上加上光阑,不仅限制了入射光斑的大小,还限制了入射光的角度,但光阑明显降低了光能利用率,导致屏幕亮度明显下降。

2.3.2 梯度折射率透镜整体设计

梯度折射率透镜需要与 LED 阵列一一对应,因此将梯度折射率透镜设计成 5×3 矩阵。为了配合数字微镜元件,梯度折射率透镜单元的端面为正方形,单个梯度折射率透镜单元的入射端面和出射端面均镀有增透膜,减少光线的反射和吸收。所有梯度折射率透镜单元拼接在一起为矩形,如图 5 所示。正方形外形也便于拼接加工。

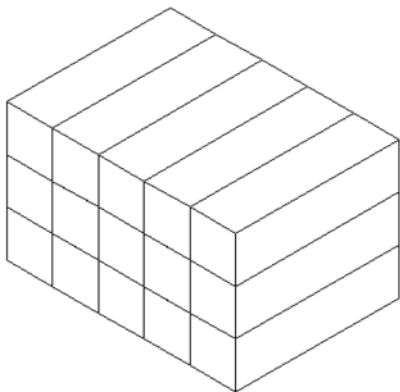


图 5 梯度折射率透镜阵列示意图

Fig. 5 Schematic diagram of gradient index lens array

梯度折射率透镜投射出的光线入射到 DMD 表面时,还要考虑到梯度折射率透镜的加工工艺,目前能加工的梯度折射率透镜的尺寸不超过 3 mm,因此梯度折射率透镜单元的端面为 $2.8 \text{ mm} \times 2.8 \text{ mm}$,所有单元拼接在一起时尺寸为 $14 \text{ mm} \times 8.4 \text{ mm}$ 。

2.4 投影镜头设计

如果所有入射到 DMD 上的光线都是平行

光,经过 DMD 上众多反射镜的反射后,所有反射光都是平行光,垂直于该平行光的任意截面都是一幅清晰的图像,该图像就是需要显示的内容,反映了 DMD 表面各个微镜的状态,投影透镜组不仅可以采用传统的正透镜组,还可以采用单独的负透镜组,投影透镜和 DMD 之间的距离可以任意设置,只要不挡住入射到 DMD 上的光线即可,而不需要 DMD 在投影透镜的物平面附近,投影透镜到屏幕的距离也可以任意设置,在屏幕上都会成清晰的像,从投影镜头出射后的光线被屏幕漫反射后进入人眼,人可以看到屏幕上清晰的图像。

如果入射光轻微的偏离了平行光,或者入射光中存在少量不平行的光线,DMD 不在投影透镜的物平面上,投射到屏幕上的图像就会模糊。考虑到人眼的分辨率极限,当物体对人眼的视角小于 $1''$ 时,人对物体的细节就不能分辨,因而允许屏幕上的图像存在轻微的模糊。有时虽然人感受到屏幕上的图像有一些模糊,但用户仍然能够接受。在这种情况下,也可以忽略少量非平行光的影响,当作上一段所论述的情况来处理,只要不遮挡入射到 DMD 上的光线,投影透镜就可以接近 DMD,这种方案降低了整机的体积,并且屏幕离投影透镜的距离也可以在较大的范围内设定,降低了投影镜头的成本,方便了用户的使用,增加了投影镜头的可靠性。

如果系统中存在较多的非平行光,那么在多数情况下,LED 需要当作很小的面光源来处理。面光源中心点发出的光线经过梯度折射率透镜后出射的光线近似为平行光,并且平行于梯度折射率透镜的主轴,如图 4 所示。而面光源上其它点出射的光线经过梯度折射率透镜后会偏离梯度折射率透镜的主轴,离面光源中心最远的位置发出的光线偏离最明显,如图 6 所示。

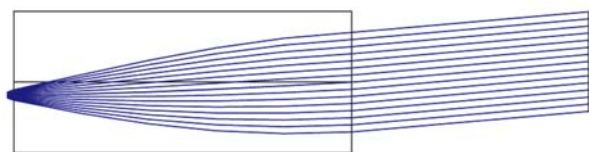


图 6 Zemax 模拟的 GRIN 透镜临界光线分布图

Fig. 6 Critical beam distribution of GRIN lens simulated by Zemax

这些光线以一定的倾角入射到梯度折射率透镜上,折射光线在端面处的切线与光轴的夹角为 θ ,在单个梯度折射率透镜的入光口上光源的宽度计作 d ,梯度折射率透镜单元的端面尺寸计作 $s \times s$,长度计作 $l(l = \pi/2\alpha)$,光线在梯度折射率透镜出射端面的切线角为 γ ,光线经过梯度折射率透镜后与透镜的主轴成 β 角出射,如图 7 所示。由于每颗 LED 之间都有吸收体分隔开,而且每个梯度折射率透镜的入光口都有光阑,因此不存在相邻 LED 光线串扰的现象。在本文的设计中,相邻的梯度折射率透镜之间有吸收光线的涂层,所以也不存在光线串扰的现象。

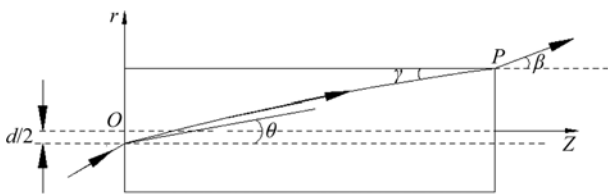


图 7 光线入射到透镜的示意图

Fig. 7 Schematic diagram of critical ray incident on lens

光线在梯度折射率透镜中的轨迹方程为^[14]:

$$r(z) = r_0 \cos(\sqrt{A}z) + \frac{1}{\sqrt{A}} r'_0 \sin(\sqrt{A}z), \quad (2)$$

其中: r_0 是光线入射的径向初始位置, r'_0 是光线入射的初始斜率, $r'_0 = \tan \theta$, $\sqrt{A} = \alpha$, A 为透镜的聚焦常数。光线传输轨迹的斜率为:

$$\frac{dr}{dz} = -\sqrt{A} r_0 \sin(\sqrt{A}z) + r'_0 \cos(\sqrt{A}z). \quad (3)$$

进一步求得光线在梯度折射率透镜出射端面的切线角 γ 为:

$$\tan \gamma = \left. \frac{dr}{dz} \right|_{z=l} = \frac{d}{2} \sqrt{A} \sin(\sqrt{A}l) + \tan \theta \cos(\sqrt{A}l). \quad (4)$$

进一步求得 $\tan \gamma = \frac{d}{2} \alpha$, 即 $\tan \gamma$ 与入光口处光源的宽度 d 有关。

根据光线的折射定律得到 $n_1 \sin \gamma = \sin \beta$, 其中 n_1 是梯度折射率透镜出射端面 p 的径向折射率, 根据梯度折射率透镜的径向折射率分布函数得 $n_1 = n_0 \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \alpha s \right)^2 \right]$, 即可求得 β 角为:

$$\begin{aligned} \beta &= \arcsin \left\{ n_0 \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \alpha s \right)^2 \right] \cdot \sin \gamma \right\} = \\ &= \arcsin \left[n_0 \left[1 - \frac{1}{8} \alpha^2 s^2 \right] \cdot \sin \left[\arctan \left(\frac{d}{2} \alpha \right) \right] \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

如图 8 所示, 光线主要以近似平行于梯度折射率透镜主轴的方式入射到 DMD 上, 与梯度折射率透镜主轴成 β 角的光线也入射到 DMD 上, 下文计算出 β 角的最大值。

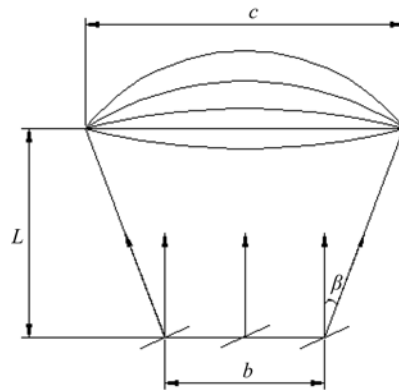


图 8 临界光线入射到投影透镜的示意图

Fig. 8 Schematic diagram of critical ray incident on projection lens

DMD 的对角线长度计作 b , 投影透镜的入瞳直径计作 c , 投影透镜与 DMD 的距离计作 L , 光线经过梯度折射率透镜后, 与梯度折射率透镜的主轴成 β 角的光线被 DMD 表面的微镜反射, 同样以 β 角入射到投影透镜中, 以减少杂散光, 即:

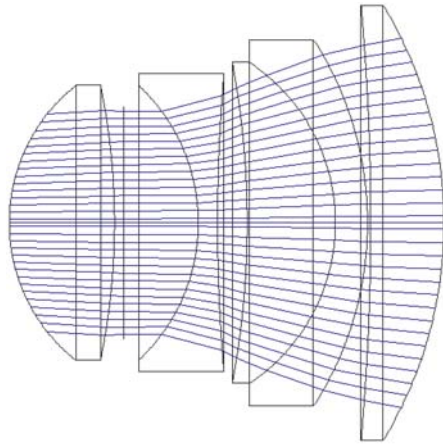
$$\tan \beta \leq \frac{c-b}{2L}. \quad (6)$$

将式(5)代入式(6), 即可得到在满足投影成像质量的前提下, 投影透镜的入瞳、梯度折射率透镜入光口上光源宽度的关系。如果 LED 发出的光线不能看成点光源, 只要用合适的的投影透镜, 就可以消除 LED 面光源宽度对投影质量的影响。

根据上述推导, 在镜头库中选择了一种 5 片式的投影镜头, 投影镜头的入瞳直径是 27.28 mm, 折射率为 1.6, 焦距为 11 mm。在 Zemax 软件中对该投影镜头进行了优化, 优化结果如图 9 所示。结果表明在 25 lp/mm 处, 投影镜头的 MTF 大于 0.7,

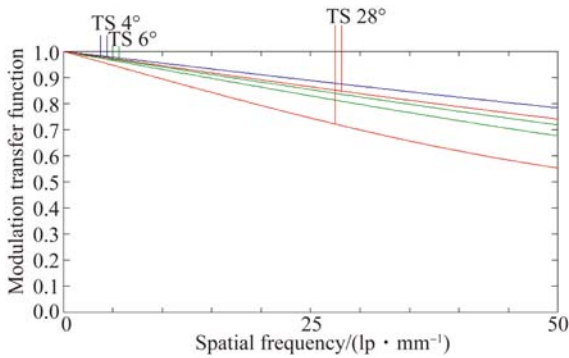
在 50 lp/mm 处,MTF 大于 0.5,镜头畸变小于 1%。

学软件建立了一个三维模型,在软件中构建了三基色 LED 面阵列、梯度折射率透镜阵列、DMD 芯片。当光线从三基色 LED 面阵列出射时,经过梯度折射率透镜后以平行光的形式入射到 DMD 上,如图 10 所示。



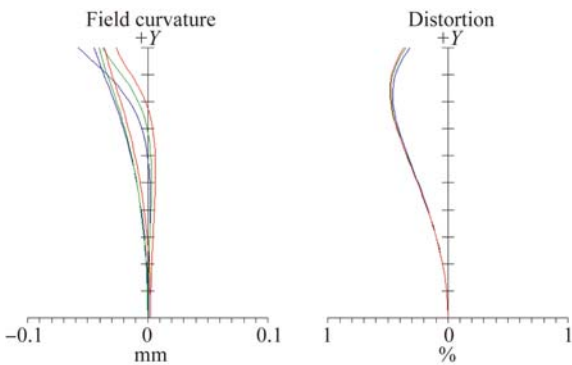
(a) 投影镜头示意图

(a) Schematic of projection lens



(b) 调制传递函数曲线

(b) Modulation transfer function curves



(c) 场曲和畸变

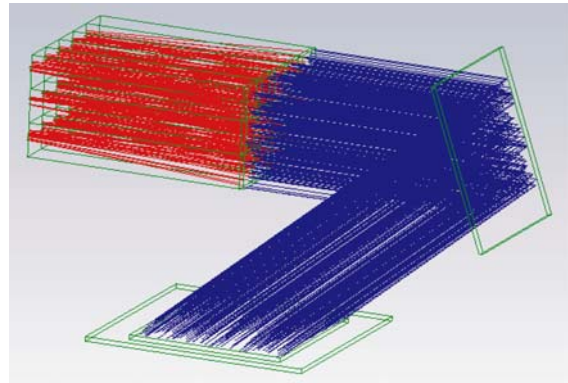
(c) Field curvature and distortion

图 9 光学仿真示意图

Fig. 9 Schematic diagram of optical simulation

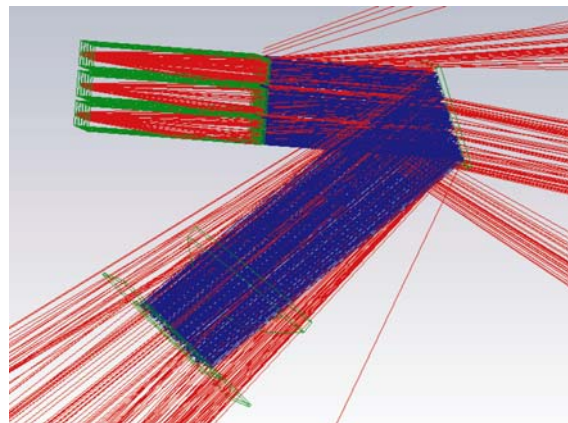
3 仿真结果

根据文中设计的光学方案,利用 Tracepro 光



(a) 平行光情况示意图

(a) Schematic diagram of parallel light



(b) 非平行光情况示意图

(b) Schematic diagram of non-parallel light

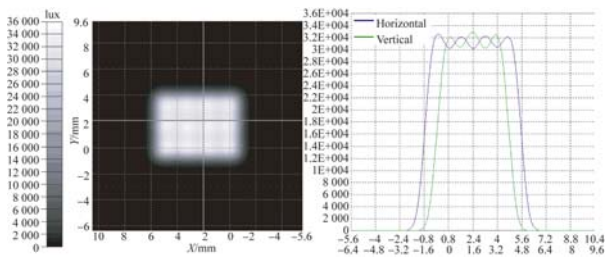
图 10 投影系统模型

Fig. 10 Model of projection system

对 Tracepro 软件中建立的模型进行光线追迹,分析得到的照度图如图 11 所示。将照度图中有效照明区域分为九个相同的正方形,每个正方形取中心点作为考核对象,根据每个正方形的中心照度 $E_1 \sim E_9$,计算出 9 个区域的平均照度 E_{ave} ;然后再找出照度的最大值,记作 E_{max} ,利用照度均匀性公式^[15]:

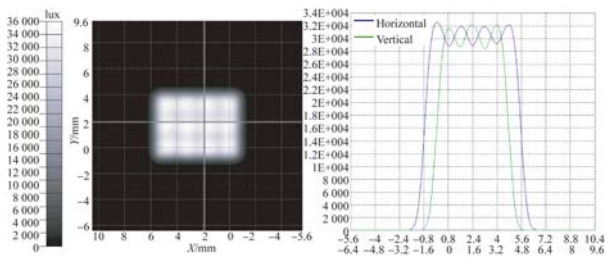
$$U = \left[1 - \frac{E_{max} - E_{ave}}{E_{ave}} \right] \times 100\%, \quad (7)$$

即可求得平行光情况下整个照明系统的均匀性为 96.9%;当光线中存在较多非平行光时,整个照明系统的均匀性为 94.2%。



(a) 平行光情况示意图

(a) Schematic diagram of parallel light



(b) 非平行光情况示意图

(b) Schematic diagram of non-parallel light

图 11 投影系统照度图

Fig. 11 Illumination charts of projection system

参考文献:

- [1] 冯奇斌, 李亚妮, 李其功, 等. 基于发光二极管配光曲线设计自由曲面透镜 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1884-1893.
FENG Q B, LI Y N, LI Q G, *et al.*. Design of double freeform surface lens based on LED radiation characteristics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 1884-1893. (in Chinese)
- [2] 常锋, 孙志远, 王瑞光, 等. LED 显示图像的非均匀度校正改进方法 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 929-937.
CHANG F, SUN ZH Y, WANG R G, *et al.*. Improvement of nonuniformity correction of LED display images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 929-937. (in Chinese)
- [3] 郑峰, 刘丽莹, 刘小溪, 等. 多主色 LED 照明光源的相关色温调控 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 926-933.
ZHENG F, LIU L Y, LIU X X, *et al.*. Control of correlated color temperature for multi-primary color LED illumination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,

4 结论

本文设计了一种基于 LED 阵列和梯度折射率透镜的投影系统, 目的是为了简化投影系统的光路结构。分别就严格平行光、近似平行光以及非平行光三种情况进行了讨论, 并针对最后一种情况设计了投影透镜。利用 Tracepro 软件进行建模和光线追迹后, 当光线为严格平行光时光斑均匀性为 96.9%; 当光线中存在较多非平行光时光斑均匀性为 94.2%, 相比于其它文献中 92% 的光斑均匀性有所提高^[16]。在本文提出的方案中, 如果 LED 发出的光线不能看成点光源, 只要用合适的投影透镜, 就可以消除 LED 面光源宽度过大对投影质量的影响。该方案大大简化了光学引擎的结构, 具有广泛的市场应用前景, 并为研制新型的投影系统提供了参考。

本文使用的 LED 功率较小, 导致画面亮度较低, 若采用大功率、小体积的 LED, 有助于提高投影仪的亮度。如果采用后工作距比较大的反远距镜头, 还能够进一步缩小系统的体积。

23(4): 926-933. (in Chinese)

- [4] 冯奇斌, 杨光磊, 井长龙, 等. 固态体积式真三维立体显示发光二极管投影光源 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1113-1119.
FENG Q B, YANG G L, JING CH L, *et al.*. LED-based projection light source for solid-state volumetric true-3D display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1113-1119. (in Chinese)
- [5] 赵星, 吴宏超, 宋丽培, 等. 微型投影机自由曲面 LED 聚光器的设计 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2123-2129.
ZHAO X, WU H CH, SONG L P, *et al.*. Design of freeform LED concentrator for micro-projector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2123-2129. (in Chinese)
- [6] 屠大维, 吴仍茂, 杨恒亮, 等. LED 封装光学结构对光强分布的影响 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 832-838.
TU D W, WU R M, YANG H L, *et al.*. Effect of optical structure on output light intensity distribution in LED package [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 832-838. (in Chinese)
- [7] KIM D S, CHO K, KIM S, *et al.*. Highly efficient

- projection system for a single DLP panel [J]. SPIE, 2003, 5186, doi: 10.1117/12.503959.
- [8] GÜNTHER A. Optical concept for an active headlamp with a DMD array [J]. SPIE, 2008, 7003: 70032D.
- [9] REFAI H H, SLUSS J J, TULL M P. Digital micromirror device for optical scanning applications [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(8): 085401.
- [10] 吕伟振, 刘伟奇, 魏忠伦, 等. 大屏幕投影显示光学系统的超薄化设计 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2020-2025.
LÜ W ZH, LIU W Q, WEI ZH L, *et al.*. Design of ultra-thin optical systems in large screen projection display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2020-2025. (in Chinese)
- [11] RUI D W, LIN Z L, QI K CH, *et al.*. Optical design in illumination system of digital light processing projector using laser and gradient-index lens [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 013004.
- [12] 赵星, 方志良, 崔继承, 等. 微型投影机光学引擎的研究 [J]. *光学学报*, 2007, 27(5): 913-918.
ZHAO X, FANG ZH L, CUI J CH, *et al.*. Study on the optical engine of the mini-projector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 913-918. (in Chinese)
- [13] 康为民, 李延彬, 高伟志. 数字微镜阵列红外动态景象模拟器的研制 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 753-756.
KANG W M, LI Y B, GAO W ZH. Dynamic IR scene projector using a digital micro-mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 753-756. (in Chinese)
- [14] DAI W, YANG Y H, SONG K Y, *et al.*. Low-loss $1 \times N$ microstructured fiber coupling method with a single gradient index lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 40600401.
- [15] ZHEN Y K, YE Z, YU F H. Ultrahigh-performance lamp illumination system with compound parabolic retroreflector for a single liquid-crystal-on-silicon panel display [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(5): 054001.
- [16] ZHAO SH, WANG K, CHEN F, *et al.*. Integral freeform illumination lens design of LED based pico-projector [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(13): 2985-2993.

作者简介:



朱向冰 (1973—), 男, 安徽芜湖人, 教授, 中国光学学会光电技术专业委员会委员, 1994 年于安徽师范大学获得学士学位, 1997 年于中科院等离子体物理研究所获得硕士学位, 2003 年于中国科技大学获得博士学位, 主要研究方向为光电技术。E-mail: asd05tx@126.com



钱立勇 (1991—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 2015 年于淮南师范学院获得学士学位, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: yong15836@126.com

(本栏目编辑: 曹 金)