

LED 微阵列投影系统设计

冯思悦^{1,2}, 梁静秋^{1*}, 梁中翥¹, 吕金光¹, 陶金¹, 王维彪^{1*}, 秦余欣¹, 孟德佳¹
(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为满足便携式投影仪的市场需求,设计了一种基于LED微型阵列的投影系统。该系统由显示单元和投影物镜构成。采用尺寸为12 mm×9 mm的自发光LED微型阵列作为系统的显示单元,利用光学设计软件设计了投影物镜。投影物镜采用反远距光学结构,全视场角为80°,焦距为8 mm,属于强光、广角镜头。在空间频率20 lp/mm处,该物镜的调制传递函数大于0.85,畸变小于2%,符合投影系统的设计要求。该投影系统具有体积小,结构简单,投影效果好,易加工等诸多优势,可为第三代投影技术的发展提供参考。

关键词: Micro-LED、微型投影、显示单元、成像系统、大视场

中图分类号: TH744 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20191201.0088

Design of projection system for a micro-LED array

FENG Si-yue^{1,2}, LIANG Jing-qiu^{1*}, LIANG Zhong-zhu¹, LV Jin-guang¹,
TAO Jin¹, WANG Wei-biao^{1*}, QIN Yu-xin¹, MENG De-jia¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and
Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

Abstract: In order to meet market demand for portable projectors, a projection system using an LED micro array and composed of a display light source and an imaging system is designed. The size of the self-luminous micro-LED array is 12 mm×9 mm. This micro-LED array is used as the light source. A projection lens suitable for the light source is designed by using Zemax software. The projection adopts an anti-distance optical structure with a full field-of-view angle of 80 degrees and a focal length of 8 mm. This projection uses a strong-light and wide-angle lens. The modulation transfer function of the objective lens is greater than 0.85 at a spatial fre-

收稿日期: 2017-10-17; 修订日期: 2017-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61274122, No. 61627819); 吉林省科技发展计划(No. 20160204007GX, No. 20180201024GX); 广东省科技计划(No. 2016B010111003); 应用光学国家重点实验室开放基金, 中国科学院青促会项目(No. 2018254)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 61274122, No. 61627819); Jilin Province Science and Technology Development Plan(No. 20160204007GX, No. 20180201024GX); Guangdong Science and Technology Project(No. 2016B010111003); Open Fund Project of SKLAO and Youth Innovation Promotion Association(No. 2018254)

quency of 20 lp/mm and its distortion is less than 2%, which meets the design requirements of the projection system. The projection system has many advantages, such as a small size, a simple structure, good projection, easy production, etc.. It can also provide reference for the development of third-generation projection technology.

Key words: Micro-LED; pico-projection; display light; imaging system; wide field

1 引言

投影显示是指由驱动电路将图像信息生成图像后,经光学系统和投影空间将其放大显示在投影屏幕上的技术。投影技术历经三代变革,第一代投影技术采用阴极射线管作为成像器件,器件内的荧光粉在高压作用下经发光系统放大、会聚,在屏幕上显示出彩色图像。第二代投影技术采用液晶光板进行图像调制,经投影系统对图像进行传输与显示。随着人们对产品舒适度要求的提高,投影技术已在第二代技术的基础上,向高亮度、高质量、微小型等方面发展^[1-3]。其中,微型投影仪是第三代投影仪的主要发展方向,其具有体积小、显示尺寸大、光能利用率高等特点^[3-4]。这种微型投影仪的结构多由背光单元(Backlight Unit,BLU)、色轮、显示单元、合色棱镜、反射镜、投影镜头等组成,BLU常为发光二极管(Light Emitting Diode,LED)^[5]。目前应用最广泛的投影系统为硅基液晶板(Liquid Crystal on Silicon, LCOS)和数字光处理(Digital Light Processing, DLP)系统,其专利技术归属于德州仪器、爱普生和索尼等公司^[6-7]。DLP系统的工作原理是将BLU发出的光经透镜、匀光元件和色轮时域分光后,利用数字微反射镜器件(Digital Micro mirror Device,DMD)反射成像,最后图像经投影系统投射到显示屏上。LCOS投影系统的工作原理是将BLU发出的光经分色镜分为RGB三种色光后,经3个不同的液晶光板调制成像,图像通过投影系统投射到显示屏上。这两种投影系统的显示单元都不具有主动发光的特点,BLU发出的光在投射到显示单元前遭到了大量损失,导致只有2.8%的光源能量可以传输到显示单元上,并产生了杂散光干扰现象。除此之外,相比于Micro-LED,DMD的生产成本较高、LCOS难以进行良好散热。

这些不足也影响着这两种系统的发展^[8]。

随着工艺技术的发展,Micro-LEDs(微型LED)引起人们的关注,这是一种可以主动发光的高密度微小尺寸的LED^[9]。2011年,美国德克萨斯科学技术的Jacob Day等人研制出640 pixel×480 pixel阵列的GaN基LED高分辨率微显示器件。其像素单元大小为12 μm,每个单元间隔为3 μm,显示器件接入1 μA电流时,发光强度为 4×10^6 cd/m²,此亮度较传统液晶显示器(Liquid Crystal Display,LCD)或有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diode,OLEDs)高出3~4个数量级^[10]。国内在Micro-LEDs领域起步较晚,香港科技大学的Liu Zhaojun等人于2013年研制出具有360PPI像素分辨率的全彩色LED阵列,单个像素尺寸为50 μm,像素间距为70 μm^[11-12];中国科学院长春精密机械与物理研究所Liang Jingqiu课题组于2016年研制出320×240个像素尺寸为80 μm,像素间距为20 μm的Micro-LED阵列,当通以10 mA电流时,单个像素的输出功率可达326.4 μW^[13]。Micro-LEDs具有工作电压低、发光效率高、响应速度快、结构紧凑、分辨率高等优点,其发光单元尺寸可以控制到微米量级,能够满足高分辨率显示的要求。Micro-LEDs的应用范围覆盖了从显示、医疗、生物到军事、通讯、探测等诸多领域^[13-14]。

本文基于Micro-LEDs优异的光学特性,将高发光亮度的自发光微显示器件Micro-LEDs的二维阵列作为投影系统中的显示源,设计了一种微LED阵列投影系统。在设计中根据应用需求,对光学元件的数量、元件尺寸及光路复杂程度等方面进行了优化,使之在不影响系统光能利用效率及杂散光有效抑制的前提下实现微型化要求。这种投影系统具有良好的成像质量,可广泛应用于家庭影院、车载投影、便携式投影、增强现实、虚拟现实等诸多领域。

2 系统结构及工作原理

如图 1 所示,微型投影系统由 3 部分组成,包括 3 个单色 Micro-LEDs 阵列、投影物镜(合色棱镜与中继成像镜组)及接收屏等。由驱动电路控制 3 个单色 Micro-LEDs 阵列进行图像显示,合色棱镜进行色光合成,出射光经投影物镜放大,最终

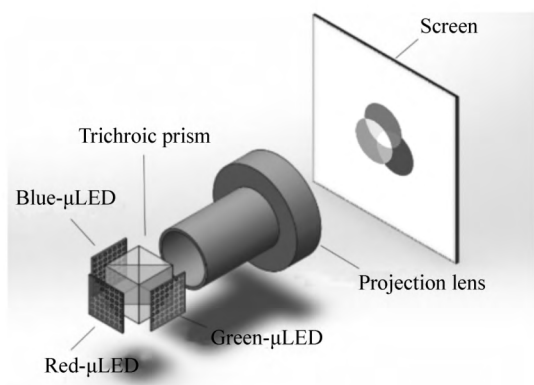


图 1 系统整体结构示意图

Fig.1 Schematic of optical system overall structure

成像于接收屏上^[13]。投影物镜作为系统终端,对投影仪的成像质量、色彩还原度等方面具有重要影响,需重点考虑投影镜头的设计及优化。

3 系统参数及设计指标

3.1 显示单元

目前,商用投影系统大多为采用 LED 作为背光光源的 DMD 微反射镜系统或 LCOS 液晶光板系统,系统中额外的照明光路会引入较大的杂散光,同时也增加了系统的体积和制造成本,严重影响了投影效果和投影仪的普及。由此,本文提出了将 3 个单色 Micro-LEDs 阵列作为显示源的微型投影系统,具体参数如表 1 所示。3 个单片 Micro-LEDs 阵列的空间分辨率均为 480×360 ,像素周期长度为 $25 \mu\text{m}$,3 片红、绿、蓝 Micro-LEDs 阵列合色后的色域范围高于 NTSC 标准^[14]。Micro-LEDs 阵列采用 MEMS 工艺制作,像素尺寸小、位置精度高、一致性好,随着制作技术的发展,可以进一步减小像素尺寸,实现更高的分辨率。

表 1 Micro-LED 阵列参数表

Tab.1 Parameters of micro-LED display

Arrays type	Panel size/mm	Length-width ratio	Pixel size/ μm	Pixel amount
Red micro-LEDs	12×9	4: 3	25×25	480×360
Green micro-LEDs	12×9	4: 3	25×25	480×360
Blue micro-LEDs	12×9	4: 3	25×25	480×360
Total pixels	$(480 \times 360) \times 3$			

3.2 投影物镜

投影物镜由合色棱镜及中继成像镜组构成,在设计中,将合色棱镜当成平行平板与中继成像镜组进行优化设计。投影系统如图 2 所示, Micro-LEDs 阵列的尺寸及单像素尺寸分别决定了图像的视场范围和图像分辨率。系统通过合色棱镜进行色光合成,出射面的每一条光线都包含了 R、G、B 三种色光成分。为了实现不同颜色的输出,利用电子学系统对 R、G、B 色光进行调制。本文采用反向设计方法设计投影物镜,设 Micro-LEDs 阵列对角线长度为 η' ,焦距为 f' ,半视场角为 ω ,根据几何光学系统的物像关系,有:

$$\eta'/2f' = \tan \omega. \quad (1)$$

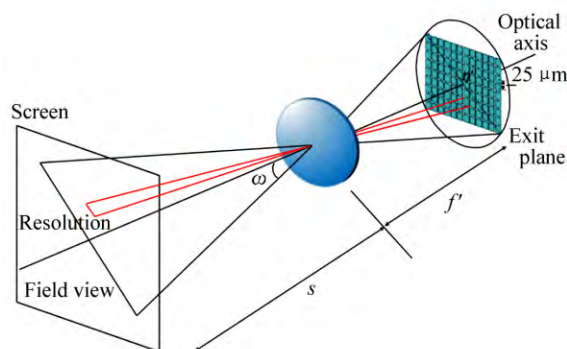


图 2 投影系统示意图

Fig.2 Sketch map of projection system

根据投影系统的应用需求,设定该投影物镜

的视场角为 80° , 由公式 (1) 可知, 其焦距为 8.1 mm。

设投影物镜的 Nyquist 频率为 p , 像素周期长度为 a , 有:

$$p = \frac{1}{2 \times a} = 20 \text{ lp/mm}, \quad (2)$$

由照度学可知, 大视场光学系统中央部分的像面照度 E' 为:

$$E' = \tau \pi L \sin^2 U / \beta^2 = \tau \pi L \sin^2 U' n'^2 / n^2 = \frac{n'^2}{n^2} \tau \pi L \sin^2 U', \quad (3)$$

其中, τ 为系统透射率, L 为物体光亮度。

又

$$\sin^2 U' = \frac{D/2}{f'} = \frac{1}{2F^\#}, \quad (4)$$

由公式 (3) (4) 可得像面照度 E' 和 $F^\#$ 的关系为:

$$E' = \frac{\tau \cdot \pi \cdot L}{4(F^\#)^2}. \quad (5)$$

取系统透过率 $\tau = 0.5$, 由照度学可知, 一般室内观测仪器的光照度值为 $30 \sim 50 \text{ lx}$, 取 $E' = 50 \text{ lx}$; 目前的加工工艺可以使单色 LED 微阵列的亮度达到 10^5 cd/m^2 以上^[7], 取 $L = 10^5 \text{ cd/m}^2$, 由式 (5) 可得 $F^\# \leq 3.97$ 。选择系统的 $F^\# = 2.5$ 以保证系统的光通量和分辨率。综上, 投影物镜的具体参数及指标如表 2 所示。

对系统参数的合理性进行评价, 将以上设计参数代入经验公式 (6):

$$C = \frac{D}{f'} \cdot \tan \omega \sqrt{\frac{f'}{100}}. \quad (6)$$

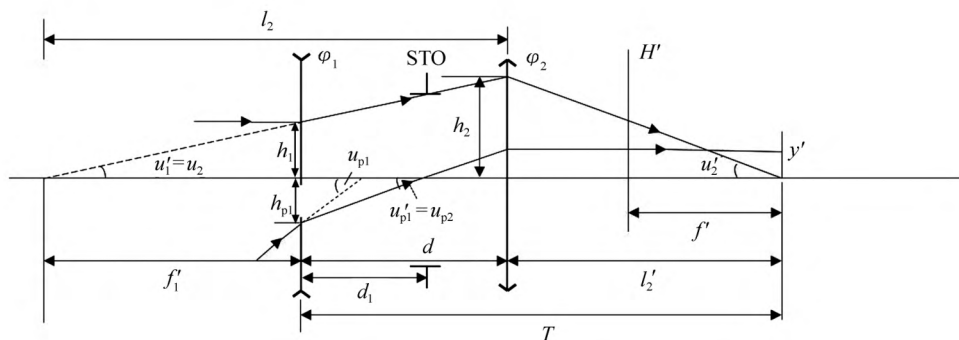


图3 反远距结构示意图

Fig.3 Structure of retrofocus lens

表2 投影物镜相关参数及设计指标

Tab.2 Optical technology parameters and design specifications

Parameters	Specifications
Chip size(diagonal) /mm	15
Focus length/mm	8
FOV/($^\circ$)	80
Wavelength/nm	400~700
$F/\#$	2.5
Prism thickness/mm	20
Prism material	LAF13
MTF	MTF $\geq 0.5@ 20 \text{ lp/mm}$
Distortion	$\leq 3\%$

在经验公式中, 当 $C < 0.24$ 时, 光学系统的像差较容易校正, 当 $C \geq 0.24$ 时, 光学系统的像差较难校正。经计算得到 $C \approx 0.095$, 表明本文光学系统的像差较容易校正。

4 投影物镜设计

4.1 投影系统结构分析

投影系统的功能是将微显示阵列上的图像真实地加以还原, 在投影屏幕上投射出大面积、成像质量高、色彩还原度好的画面。因此, 此物镜具有短焦距、大相对孔径和大视场的光学特性。

投影物镜采取反向设计的方式, 由于出射光近乎垂直地投射到像面上, 且投影物镜中存在合色棱镜, 镜头需要保留一定的后工作距离, 因此物镜采用像方远心光学系统。

该光学系统的视场角为 80° , 其相比于一般的投影系统拥有更大的视场, 故选择反远距型结构(图 3) 以保证该系统的视场要求。这种结构主要由两组透镜组成, 分别是负光焦度透镜组及正光焦度透镜组。对于大视场光学系统来说, 轴外光束先经负透镜组进行发散, 再经由正透镜组进行会聚, 成像在焦平面上^[13]。

为确定前后组透镜结构, 对反远距物镜进行高斯光学分析^[13]。在归一化条件下, 系统的光焦度 $\varphi = 1$ 。设 φ_1 为负透镜组的光焦度; φ_2 为正透镜组的光焦度, d 为两组透镜之间的距离。

令 $h_1 = 1, u'_2 = 1$, 将光阑设在后组透镜前, 归一化条件下 $u_{p1} = -1$, 此时, 拉赫不变量为:

$$J = -h_1 u_{p1} = 1, \quad (7)$$

而 $l'_{p1} = d$, 结合负透镜组光焦度公式, 可得正透镜组轴外主光线角放大率 γ_1 的倒数:

$$\frac{1}{\gamma_1} = \frac{u_{p1}}{u'_{p1}} = 1 - d_1 \varphi_1, \quad (8)$$

$$l'_2 = h_2 = 1 - d\varphi = \frac{1}{\gamma_1}, \quad (9)$$

即负透镜组的角放大率等于光学系统后工作距离的倒数。

由于系统为像方远心光路系统, 因此光阑位于正透镜组的前焦面上, 有:

$$d = d_1 + f'_2 = \frac{1 - \frac{1}{\gamma_1}}{\varphi_1} + \frac{1}{\varphi_2}, \quad (10)$$

此时光学系统总长度为:

$$T = d + l'_2 = \frac{1}{\gamma_1} + \frac{1 - \frac{1}{\gamma_1}}{\varphi_1} + \frac{1}{\varphi_2}, \quad (11)$$

又 $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2 = 1$, 则正透镜组的光焦度与 $\frac{1}{\gamma_1}$ 的关系为

$$\frac{\varphi_2}{\gamma_1} = 1. \quad (12)$$

此时, 正负透镜组的孔径角 u'_1, u'_2 分别为:

$$\begin{aligned} u'_1 &= \varphi_1 \\ u'_2 &= u'_1 + 1 - \varphi_1 \end{aligned}, \quad (13)$$

负透镜组轴外主光线的相对孔径为:

$$h_{p1}\varphi_1 = \frac{2\left(\frac{1}{\gamma_1} - 1\right)}{2 \cdot \frac{1}{\gamma_1}}, \quad (14)$$

负透镜组轴外主光线的高度为:

$$h_{p1} = \frac{\frac{1}{\gamma_1} - 1}{\frac{1}{\gamma_1}\varphi_1}. \quad (15)$$

由上述高斯光学知识可知, 当 φ_1 和 $\frac{1}{\gamma_1}$ 一定

时, 系统参数 φ_2, h_2, h_{p1} 和光学系统总长度 T 均可相应确定, 并可求得前后组透镜的相对孔径。

对于微型投影仪的设计, 除了满足成像效果的要求外, 还须对系统进行微型及轻量化处理。

通过公式推导可知, $\frac{1}{\gamma_1}, d, \varphi_1$ 决定着光学系统的

结构, 三者是相辅相成的。其中 $\frac{1}{\gamma_1}$ 起主要作用, 它

影响着系统的后截距和视场角, 进而影响整个系统的组成和复杂程度。因此需选择合适的结构作为系统的负透镜组, 一般选择具有负光焦度的双胶合透镜, 正、负分离型透镜或更复杂的光学结构作为系统的负透镜。由于受到负光焦度的制约, 任何结构都会产生一定的像差, 因此需要选择合适的正透镜组来平衡前组遗留的像差。正透镜组一般选择双高斯、三片式或 Petzval 型以及它们的复杂化结构。

4.2 投影系统结构优化

对于透镜种类选择而言, 选用非球面透镜可以提高系统性能, 并在降低系统像差方面有着很明显的优势, 但由于其制作难度大, 成本高, 因此, 本文在优化过程中, 不采用非球面透镜, 以减少系统的制作成本。

本文采用正负分离型的反远距结构作为投影系统前组的初始结构, 虽然实现了大视场的要求, 但对于大视场应用引入的较大像差问题还需进一步解决。因此, 引入变形化的双高斯结构, 用来消除反远距物镜的残余像差, 同时实现大视场和小

像差的设计目标。

利用 Zemax 光学设计软件对所选初始结构进行优化,依据设计指标参数,对结构焦距、视场、波长等参数进行约束,保证设计结果的合理性。

经过多次优化,最终设计的系统结构如图 4 所示。系统由十片球面透镜和一块合色棱镜组成。系统总长为 100 mm,焦距为 7.99 mm,全视场为 80° 。

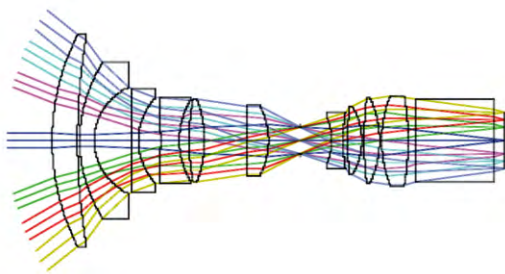


图 4 优化后投影物镜光路示意图

Fig.4 Structure of optical path for optimized projection objective

5 光学性能评价及公差分析

5.1 光学性能评价

系统的 MTF 曲线如图 5 所示,可见 MTF 在

5.2 能量及照度分析

图 7(a) 为光学系统的能量集中度曲线。系统选用的 LED 显示芯片尺寸为 $25\ \mu\text{m}$,当扩散光

斑半径达到 $10\ \mu\text{m}$ 时,能量集中度在 90% 以上。图 7(b) 为系统的相对照度,可见不同视场的照度分布均匀。

图 8(a) 为投影系统在 Lighttools 的光线追迹仿真图,图 8(b) 为接收屏上的图案显示结果。在显示光源上点亮“十”字形图案,经透镜组投影放大后,成像于接收屏上。接收屏上的照度为 $3.162 \times 10^5\ \text{W}/\text{mm}^2$,达到室内投影照度的要求。

表 3 光学系统公差范围

Tab.3 Tolerance range in this optical system

Parameter	Value
-----------	-------

Nyquist 频率处高于 0.85,优于设计指标。

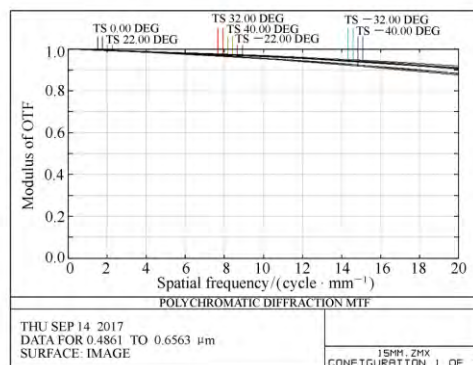


图 5 20 lp/mm 处 MTF 曲线图

Fig.5 MTF curves of imaging system at 20 lp/mm

光学系统的点列图如图 6(a) 所示,结果显示弥散斑的均方根半径小于 $7.5\ \mu\text{m}$,R、G、B 三种色光的弥散斑没有发生分离,色差很小,成像效果较好。光学系统的场曲和畸变曲线如图 6(b) 所示,可见“像面弯曲”程度很小。而对于投影物镜来说,系统畸变是一项重要的指标,本系统的最大畸变小于 2%,人眼所能分辨的畸变量为 3%,最大视场畸变小于 1.6%,满足设计指标的要求。

Radius (fringes)	$N=2$
Thickness/mm	0.02
Decenter X/Y/mm	0.02
Tilt X/Y (degrees)	0.008 3
S+A Irregularity (fringes)	$\Delta N=0.2$
Index of refractive	0.000 1
Abbe number/%	1

表 4 20 lp/mm 处光学系统的 MTF

Table 4 MTF at 20 lp/mm in this optical system

Parameter	Value
Nominal	0.901
Best	0.899
Worst	0.762
Mean	0.866
Standard deviation	0.029

5.3 公差分析

表 3 为该系统的公差设置情况。利用 Zemax

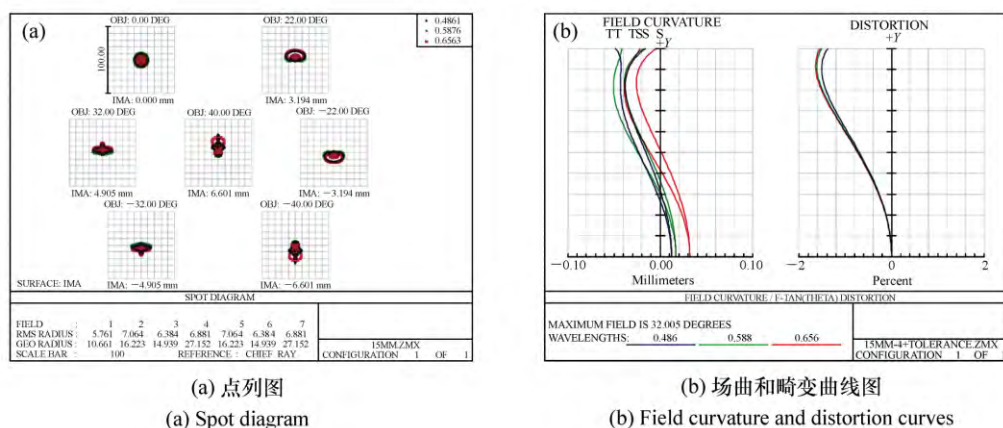


图 6 像差分析图

Fig.6 Aberration analysis diagram

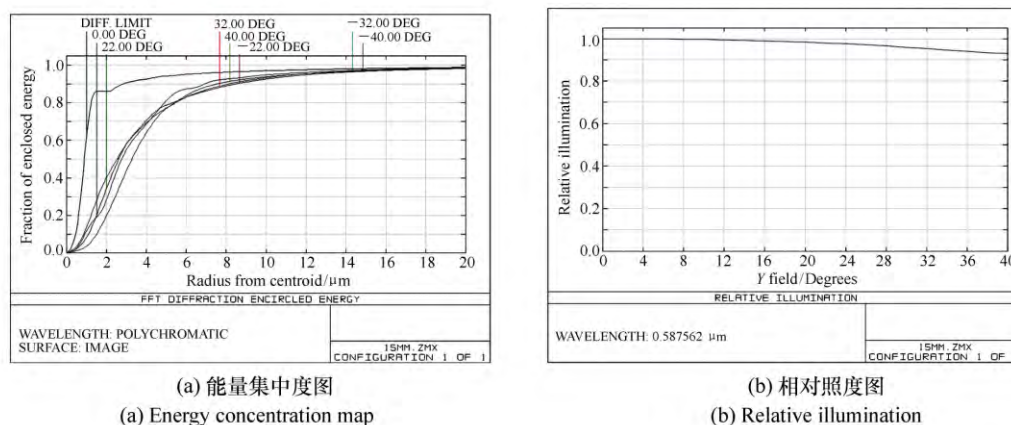


图 7 能量及照度分析图

Fig.7 Analysis diagrams for energy and illumination

进行公差分析后,系统 Nyquist 频率处的 MTF 变化情况如表 4 所示。可以看出,该光学系统的平均 MTF 值可达 0.866,系统对公差不敏感。

6 结 论

本文设计了一种新型的微型投影系统,该系统使用自发光 Micro-LED 阵列作为显示光源,与传统 DMD 微反射镜系统或 LCOS 液晶光板系统相比,提升了能量利用率,并降低了杂散光的干扰。投影物镜由合色棱镜和成像物镜组成,全长 100 mm,全视场角为 80° ,在空间频率 20 lp/mm 处,其调制传递函数大于 0.85,畸变小于 2%,各视场成像效果良好。光线追踪结果显示,该投影

系统可清晰再现光源的图像,像面照度可达 $3.162 \times 10^5 \text{ W/mm}^2$,符合室内对投影仪光照度要求。这种微型投影系统的设计为未来便携式、轻型化、自发光的微型投影仪的发展提供参考和技术支持。

参考文献:

- [1] 张霁,葛晨莹.智能投影发展现状及政策博弈[J].声屏世界,2016(12):67-68.
ZHANG J,GE CH Y. Development status and policy of intelligent projection[J]. Voice & Screen World,2016(12):67-68.(in Chinese)
- [2] 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.

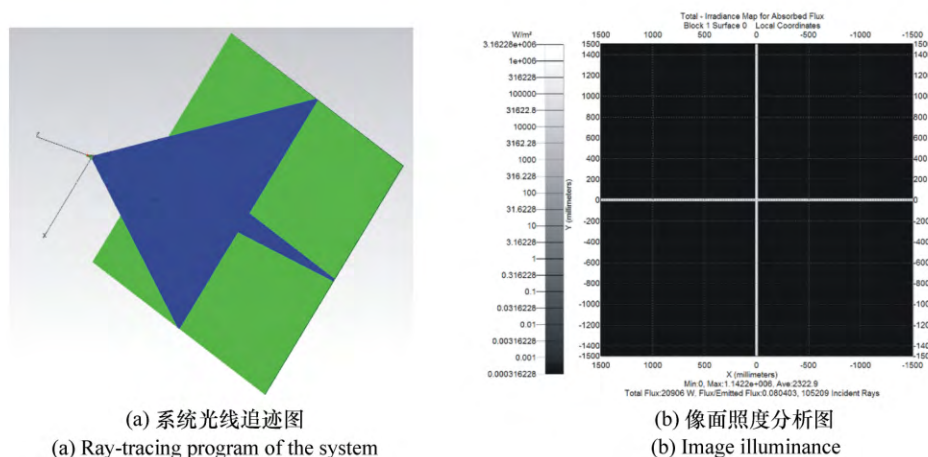


图 8 光线追迹图及像面照度分析

Fig.8 Ray-tracing diagram and image illuminance map

- LV 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)
- [5] HUNG K Y, CHUANG Y J, TSAI Y W, *et al.*. Integration of the innovative 3D micro prism design and fabrication technology for a pico-projection system [J]. *International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics*. IEEE, 2014: 109-110.
- [6] 翟奕, 刘永基, 何远清. 投影式头戴静脉显像光学系统的设计 [J]. *中国光学*, 2015, 8(1) : 114-120.
- ZHAI Y, LIU Y J, HE Y Q. Optical system design of the head-mounted projective display for vein imaging [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1) : 114-120 (in Chinese)
- [7] CHOU H H, LIAW S K, JIANG J S, *et al.*. Experimental study of red-, green-, and blue-based light emitting diodes visible light communications for micro-projector application [J]. *Fiber & Integrated Optics*, 2016, 35(3) : 98-113.
- [8] 陈琛, 胡春海. 球幕投影通用型变焦鱼镜头设计 [J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(2) : 323-335.
- CHEN CH, HU CH H. Design of general type zoom fish-eye lens for dome-screen projector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2) : 323-335. (in Chinese)
- [9] SUN W S, PAN J W. Non-telecentric projection lens design for an LED projector [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3) : 712-720.
- [10] 陈晓西, 李光勇, 王继岷, 等. 基于液晶多层屏的 3D 显示系统和算法设计 [J]. *液晶与显示*, 2017, 32(4) : 302-307.
- CHEN X X, LI G Y, WANG J M, *et al.*. Liquid crystal multi-layer 3D display system and algorithm design [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(4) : 302-307 (in Chinese) .
- [11] LIU Z J, WONG K M, CHI W K, *et al.*. Monolithic LED microdisplay on active matrix substrate using flip-chip technology [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(4) : 1298-1302.
- [12] DAY J, LI J, LIE D Y C, *et al.*. III-Nitride full-scale high-resolution microdisplays [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(3) : 031116.
- [13] WONG K M, LAU K M, CHONG W C, *et al.*. 360 PPI flip-chip mounted active matrix addressable light emitting diode on silicon(LEDoS) micro-displays [J]. *IEEE/OSA Journal of Display Technology*, 2013, 9(8) : 678-682.
- [14] BAO X P, LIANG J, LIANG Z, *et al.*. Design and fabrication of AlGaInP-based micro-light-emitting-diode array devices [J]. *Optics Laser Technology*, 2016, 78: 34-41.
- [15] BI X P, XIE T, FAN B, *et al.*. A flexible, micro-lens-coupled LED stimulator for optical neuromodulation [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits & Systems*, 2016, 10(5SI) : 972-978.

- [4] SAND A, RAKKOLAINEN I. Mixed reality with multimodal head-mounted pico projector [C]. Virtual Reality International Conference: Laval Virtual. 2013: 1-2.
- [5] 郝亚茹, 邓招奇, 邓春健. LED 显示控制系统移存频率加速方法研究 [J]. 液晶与显示, 2016, 31(5) : 470-476.
HAO Y R, DEGN ZH Q, DENG CH J. Increasing shift frequency of LED display control system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(5) : 470-476. (in Chinese)
- [6] 吕伟振, 刘伟奇, 张大亮. 激光与 LED 混合投影光源色度学特性分析 [J]. 液晶与显示, 2015, 30(2) : 369-373.
LV W ZH, LIU W Q, ZHANG D L. Colorimetric analysis of laser and LED hybrid projection sources [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(2) : 369-373. (in Chinese)
- [7] HERRNSDORF J, MCKENDRY J J D, ZHANG S, et al.. Active-matrix GaN micro light-emitting diode display with unprecedented brightness [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, 62(6) : 1918-1925.
- [8] 李林, 黄一帆, 王涌天. 现代光学设计方法 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
LI L, HUANG Y F, WANG Y T. *The Method of Optical Design* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2015. (in Chinese)
- [9] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计 [M]. 第 3 版. 杭州: 浙江大学出版社, 2014.
LI XI T, CEN ZH F. *Geometrical Optics, a Berrations and Optical Design* [M]. Third Edition. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2014. (in Chinese)

作者简介:



冯思悦(1991—), 女, 吉林省吉林市人, 硕士研究生。主要从事光学系统设计及微光机电系统方面的研究。E-mail: 18744019144@ 163.com



梁静秋(1962—), 女, 辽宁沈阳人, 博士生导师。主要从事微小型光学系统、微光机电系统(MOEMS) 及微结构光学方面的研究。E-mail: liangjq@ ciomp.ac.cn