

基于 Micro-LED 阵列的短焦距投影光学系统设计研究



张智强, 杨旭*, 张远健, 栾晓宇, 康震

吉林东光集团有限公司, 吉林长春 130031

摘要: 便携式投影仪市场需求一直很高, 因为它们具有轻便、易携带的特点, 可以方便地在不同场合使用, 例如商务演示、教育培训、家庭影院等。随着科技的不断进步, 便携式投影仪的功能也越来越多样化, 例如支持无线投屏、内置电池、高清投影等, 这些功能也进一步增加了市场需求。设计了一种基于 LED 微型阵列的投影系统。该系统由一个显示单元和一个投影物镜组成。采用一个 10mm×7.5mm 自发光 LED 微型阵列作为显示单元, 采用光学设计 zemax 对投影物镜进行设计。投影物镜具有反远距光学结构, 全视场 66°; 焦距 8.5mm; 空间频率为 85lp/mm 时, 物镜的调制传递函数 MTF 大于 0.5, 畸变小于 1%。满足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、加工方便等优点, 可为第三代投影技术的发展提供参考。

关键词: 微距投影; MICRO-LED; 紧凑设计; 交互式投影系统

DOI: 10.57237/j.mse.2023.02.001

Design of Micro-LED Array Short Focal Length Projection System

Zhang Zhiqiang, Yang Xu*, Zhang Yuanjian, Luan Xiaoyu, Kang Zhen

Jilin Dongguang Group Co., LTD., Changchun 130031, China

Abstract: The market demand for portable projectors has been high because they are portable and can be easily used on different occasions, such as business demonstrations, educational training, home theater, etc. With the continuous progress of technology, portable projectors have more and more diversified functions, such as supporting wireless screen projection, built-in battery, HD projection, etc., which also further increase the market demand. A projection system based on the LED microarray was designed. The system consists of a display unit and a projection objective lens. A 10mm×7.5mm self-emitting LED microarray was used as the display unit, and the projection objective was designed with an optical design zemax. The projection objective has antireflective optical structure with full field of 66 and focal length of 8.5mm; At the spatial frequency of 85 lp/mm, the modulation transfer function MTF is greater than 0.5 and the distortion is less than 1%. Meet the design requirements of the projection system. The projection system has the advantages of small size, simple structure, good projection effect and convenient processing, which can provide reference for the development of the third generation projection technology.

Keywords: Micro Projection; Micro-LED; Compact Design; Interactive Projection Systems

*通信作者: 杨旭, 547114803@qq.com

1 引言

投影显示是利用平面图像信息控制光源，通过光学系统和投影空间将图像放大并显示在投影屏幕上的一种方法或装置[1]。投影技术经历了三代技术革命；第一代投影技术使用阴极射线管作为成像设备。该设备中的荧光粉在高压下被发光系统放大和聚合，并在屏幕上显示一个彩色图像。第二代投影技术使用液晶

光面板进行图像调制，该图像由投影系统传输和显示。随着人们对产品舒适性要求的提高，投影技术在第二代技术的基础上发展到高亮度、高质量、微小型等领域[2, 3]。其中，第三代投影仪的主要发展方向是微型投影仪，它具有体积小、显示器尺寸大、光能利用率高等特点[4-7]。

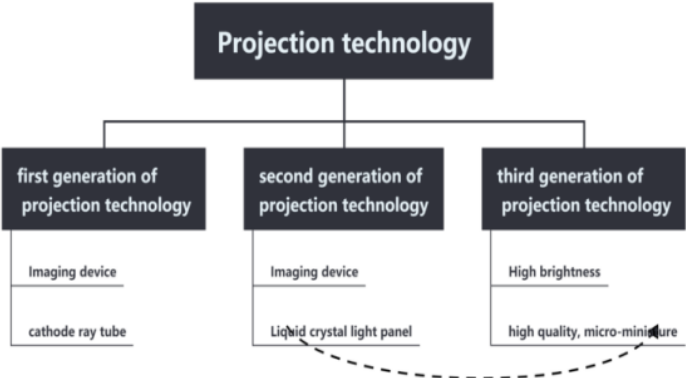


图 1 投影技术发展示意图

照明系统和投影物镜是投影仪中的核心部件，二者被称为光学引擎。其性能在很大程度上取决于照明系统的规格。目前，应用最广泛的投影系统是 LCOS 系统和 DLP 系统，其专利技术属于德州仪器、爱普生、索尼等公司[8-10]。

随着工艺技术的发展，Micro-LED 是一种高密度、小型 LED，引起了人们的关注。在中国微型 LED 领域，香港科技大学刘昭君等人于 2013 年开发了像素分辨率为 360PPI、单像素大小为 50 μm ，像素间距为 70 μm [11, 12]；2016 年，中国科学院长春精密机械物理研究所梁景秋课题组研制了 320 \times 240 像素、像素大小为 80 μm 、像素间距为 20 μm 的微 LED 阵列[13, 14]。

Micro-LED 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[15]。其发光单元的大小可以控制到微米级别，这可以满足高分辨率显示器的要求。微型 led 的应用范围涵盖了从显示、医疗、生物到军事、通信、检测等多个领域[16]。

基于 Micro-LED 优异的光学特性，利用高发光亮度自发光微显示器件微二维阵列作为投影系统的显示源，设计了一种微型 led 阵列投影系统。在设计中，根据应用要求，优化了光学元件的数量、元件的尺寸和光路的复杂性，从而在不影响系统的光能利用效率和

有效抑制杂散光的情况下实现小型化要求。这种投影系统具有良好的成像质量，可广泛应用于交互式投影、便携式投影、增强现实、虚拟现实等多个领域。

2 系统结构及其工作原理

微投影系统由 3 个部分组成，包括 3 个单色微 led 阵列、投影物镜（组合彩色棱镜和中继成像透镜组）和接收屏幕。驱动电路控制 3 个用于图像显示的单色微 led 阵列，彩色组合棱镜进行色光合成，发射的光被投影物镜放大，最后在接收屏幕上成像。投影物镜作为系统的终端，对投影仪的图像质量和色彩再现有重要的影响，因此需要考虑投影透镜的设计和优化。

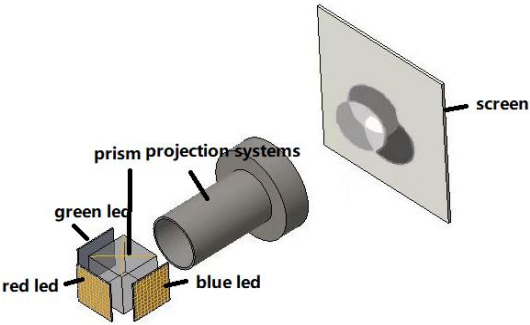


图 2 光学系统整体结构示意图

3 系统设计参数及指标

3.1 显示单元

目前,大多数商用投影系统是使用 led 作为背光源的 DMD 微镜系统或 LCOS 液晶光面板系统。系统中额外的照明光路将引入较大的杂散光。同时也增加了该系统的产量和制造成本。影响了投影效果和投影仪的普及程度。

基于这些不足,本文提出了一种以三种单色微 led 阵列作为显示源,微投影系统。具体参数见表 1。三种单片微型 led 阵列的空间分辨率为 480×360 , 像素周期长度为 $12.5 \mu\text{m}$, 三个红、绿、蓝三微型 led 阵列组合后的色域范围高于 NTSC 标准[17]。微型 led 阵列采用 MEMS 技术,像素尺寸小,位置精度高,一致性好。随着制造技术的发展,像素尺寸可以进一步减小,并可以实现更高的分辨率。

表 1 Micro-LEDs 显示器参数

Arrays type	Panel size/ mm	Length-width ratio	Pixel size/ μm	Pixel amount
Red micro-LEDs	10×7.5	4:3	12.5×12.5	480×360
Green micro-LEDs	10×7.5	4:3	12.5×12.5	480×360
Blue micro-LEDs	10×7.5	4:3	12.5×12.5	480×360
Total pixels	$(480 \times 360) \times 3$			

3.2 投影物镜

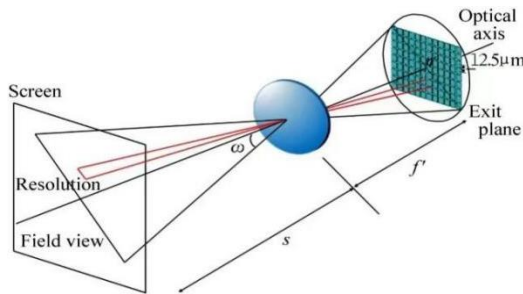


图 3 投影系统示意图

微型 led 阵列的大小和单个像素的大小分别决定了图像的视场和图像分辨率。该系统使用彩色组合棱镜来合成彩色光。出口表面上的每一束光都包含三个彩色光组件: R、G、B。为了实现不同颜色的输出,我们使用电子系统对 R、G、B 色光进行调制。图 4 CIE1931。

本文采用逆向设计方法设计投影物镜,微型 led 阵列的对角线长度为 η' , 焦距为 f' , 半场角为 ω 。根据几何光学系统的目标图像关系:

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

根据投影系统的应用要求,将投影物镜的视场角设置为 66° , 从公式(1)可以看出,焦距为 8.3mm。

假设投影透镜的奈奎斯特频率为 p , 探测器对角线长度为 a :

$$p = \frac{1}{2 \cdot a} = 80lp / mm \quad (2)$$

根据照度,光学系统中心部分的图像表面照度 E' 为

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

其中, τ 为系统传输速率, L 为物体亮度。

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

方程(E')与 $F^\#$ 之间的关系

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

取系统照度利用率 $\tau = 0.5$, 一般室内观测仪器的照明值为 $30 \sim 50 \text{lx}$, 取照明值 $E' = 50 \text{lx}$, 目前的处理过程可以使单色 LED 微阵列的亮度达到 10^5cd/m^2 以上, 取 $L = 10^5 \text{cd/m}^2$, 可通过公式(5), 可知 $F^\# \leq 3.97$, 选择 $F^\# = 1.74$ 系统以确保系统分辨率, 综上所述, 所设计系统的具体参数和指标见表 2。

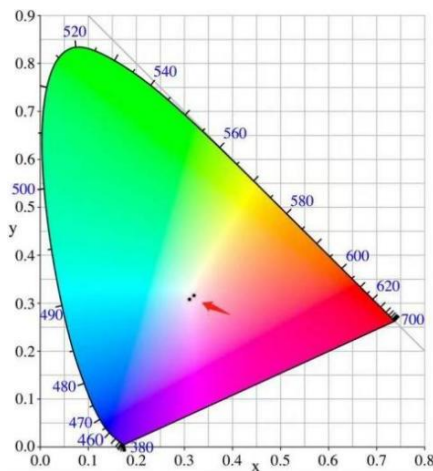


图 4 CIE1931

表 2 光学系统设计参数

Parameters	Specifications
Chip size (diagonal) / mm	12.5mm
Focus length / mm	8.3mm
FOV/ (°)	66°
Wavelength / nm	400~700nm
F/ #	1.74
Prism thickness/ mm	15mm
Prism material	H-K5
MTF	MTF≥0.5@ 85 lp / mm
Distortion	≤2%

评价系统参数的合理性，并将上述设计参数代入经验公式(6)

$$C_m = \frac{D}{f'} \tan \omega \sqrt{\frac{f'}{100}} \tag{6}$$

在经验公式中，当 $C < 0.24$ ，光学系统的像差更容易校正；当 $C \geq 0.24$ ，光学系统的像差校正比较困难[18]；该系统计算得到 $C \approx 0.129$ ，结果表明，该光学系统的像差很容易得到校正。

4 投影物镜设计

4.1 投影系统结构分析

该投影系统的功能是在微显示阵列上真实地再现图像，并在投影屏幕上投影大面积、高图像质量和良好的彩色再现。因此，物镜具有焦距短、相对孔径大、视场大的光学特性。

投影物镜设计相反，由于光几乎垂直于图像表面，投影物镜存在于组合彩色棱镜中，物镜需要保持一定

的工作距离，因此物镜采用远心光学系统的图像侧。

光学系统的视场为 66° ，选择反远距结构（图 3）是为了确保该系统所需的视场，该系统比典型的投影系统具有更大的视场。该结构由两个主要的透镜组组成，一个负焦距透镜组和一个正焦距透镜组。在大视场光学系统中，离轴光束首先被负透镜组分散，然后被正透镜组收敛，并在焦平面上成像。

为了确定前后透镜组的结构，对反长摄物镜进行了高斯光学分析，在归一化条件下，系统的光学焦距 $\phi = 1$ ， ϕ_1 为负透镜组的光学焦距， ϕ_2 为正透镜组的光学焦距， d 为两个透镜组之间的距离。

$h_1 = 1$ ， $u_2' = 1$ ，并将胶片放在后组的前面，归一化条件 $u_{p1} = -1$ ，那么拉赫不变量

$$J = -h_1 u_{p1} = 1 \tag{7}$$

$l_{p1}' = d$ ，结合负透镜组的光学焦距公式，我们可以得到正透镜体组的离轴主射线的角放大倍率 γ_1 ：

$$\frac{1}{\gamma_1} = \frac{u_{p1}}{u_{p1}'} = 1 - d_1 \phi_1 \tag{8}$$

$$l_2' = h_2 = 1 - d \phi = \frac{1}{\gamma_1} \tag{9}$$

负透镜组的角度放大率等于光学系统后面的工作距离的倒数。

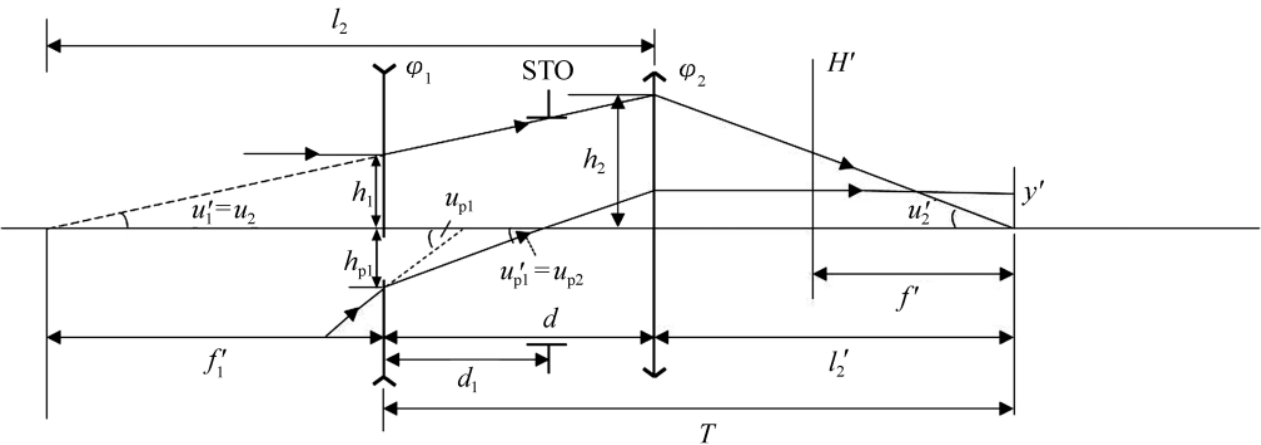


图 5 反远距透镜结构

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

$$d = d_1 + f_2' = \frac{1 - \frac{1}{\gamma_1}}{\phi_1} + \frac{1}{\phi_2} \quad (10)$$

此时光学系统总长度

$$T = d_1 + l_2' = \frac{1}{\gamma_1} + \frac{1 - \frac{1}{\gamma_1}}{\phi_1} + \frac{1}{\phi_2} \quad (11)$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - d\phi_1\phi_2 = 1 \quad (12)$$

正透镜组的光学焦距

$$\frac{\phi_2}{\gamma_1} = 1 \quad (13)$$

此时, 正、负透镜组的视场角 u_1', u_2'

$$u_1' = \phi_1 \quad (14)$$

$$u_2' = u_1' + 1 - \phi_1 \quad (15)$$

负透镜组轴外主光线的相对孔径为

$$h_{p1}\phi_1 = \frac{2(\frac{1}{\gamma_1} - 1)}{2\frac{1}{\gamma_1}} \quad (16)$$

负透镜组轴外主光线的高度为

$$h_{p1} = \frac{\frac{1}{\gamma_1} - 1}{\frac{1}{\gamma_1}\phi_1} \quad (17)$$

根据上述高斯光学知识, 当确定 ϕ_1 和 γ_{11} 时, 可以相应地确定系统参数 ϕ_2 、 h_2 、 h_{p1} 和光学系统的总长度 T , 并可以找到前后透镜的相对孔径。

对于微型投影仪的设计, 除了满足成像效果的要求外, 该系统必须是微型的和轻量级的。该公式由 $\frac{1}{\gamma_1}$ 、 d 和 ϕ_1 推导出, 确定了光学系统的结构, 这三者之间是

互补的。其中, $\frac{1}{\gamma_1}$ 起着主要作用, 影响系统的后截距

和视场, 进而影响整个系统的组成和复杂性。因此, 需要选择合适的结构作为系统的负透镜组, 一般选择具有负光学焦距的双胶合透镜、正负分离透镜或更复杂的光学结构作为系统的负透镜。由于焦距为负值, 任何结构都会产生一定数量的像差, 因此需要选择一个合适的正透镜组来平衡前一组留下的像差。正透镜集通常是双高斯式、三片式或 petzval 型及其复杂的结构。

4.2 投影系统结构优化

对于透镜类型的选择, 非球面透镜的选择可以提高系统的性能, 在降低系统像差方面具有明显的优势。本文采用正负分离型反消色结构作为投影系统前群的初始结构, 实现了大视场的要求, 但大视场引入的大像差问题有待进一步解决。因此, 引入了一种变形的双高斯结构, 以消除反长焦物镜的剩余像差, 同时实现大视场和小像差的设计目标。

采用 Zemax 光学设计软件对所选的初始结构进行优化, 并根据设计指标参数对焦距、视场、波长等参数进行约束, 以保证设计结果的合理性。

经过多次优化后, 最终的系统结构如图 4 所示。该系统由六个球面透镜、两个非球面透镜和一个组合彩色棱镜组成。该系统的总长度为 63mm, 焦距长度为 8.26mm, 视场角 66°。

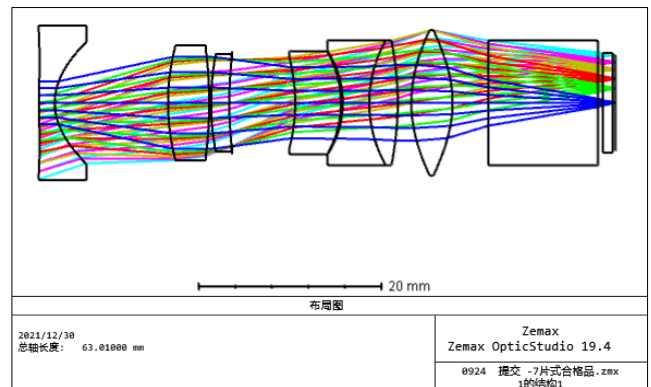


图 6 优化投影物镜的光路结构

5 光学性能评价和公差分析

5.1 光学性能评价

系统的 MTF 曲线如图 5 所示, 这表明在 Nyquist 频率下, MTF 高于 0.5, 优于设计规范。

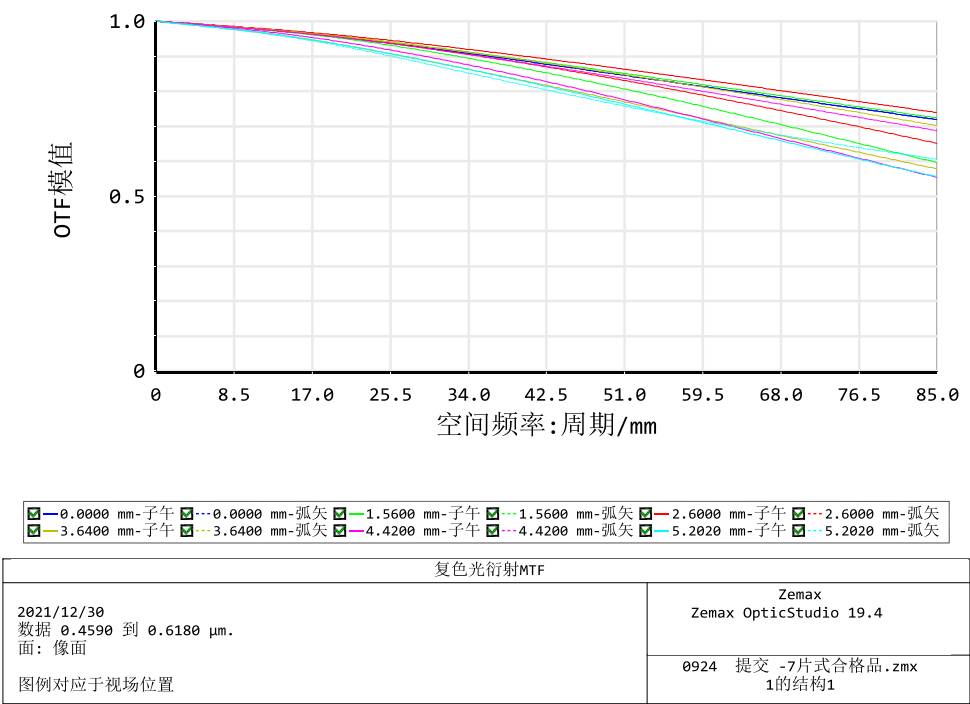
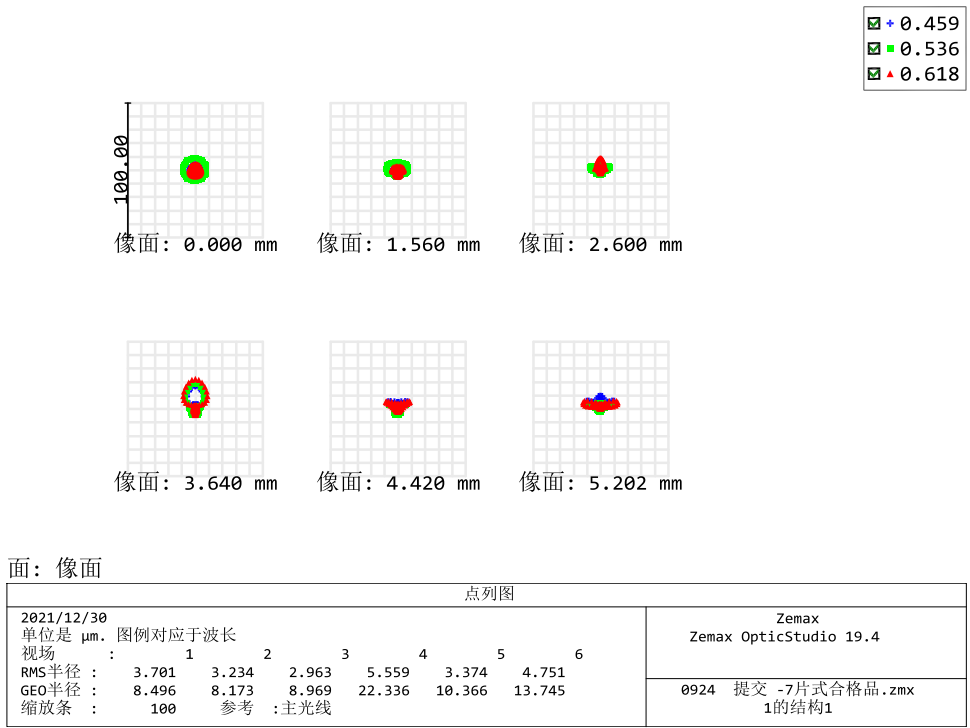
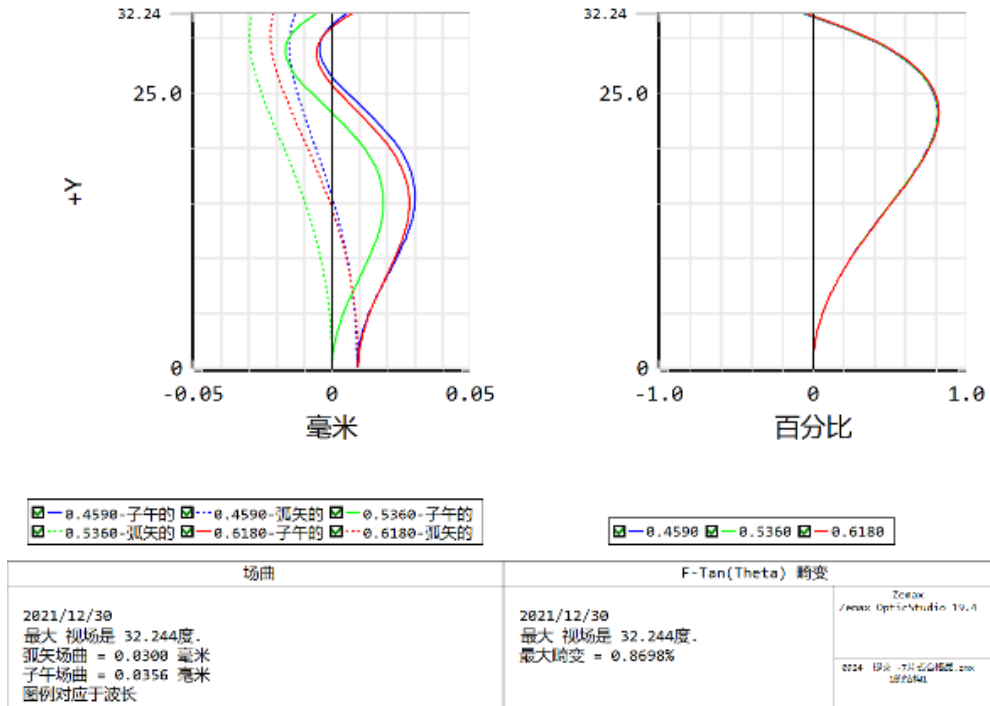


图 7 85lp/mm 时成像系统的 MTF 曲线

光学系统的点图如图 6(a)所示,说明扩散点的均方根半径小于 $6\mu\text{m}$, R、G、B 的扩散点不分离,色差很小,成像效果较好。光学系统的场弯曲和像差曲线如图 6(b)所示,说明“像平面弯曲”的程度很小。对于投影目标,系统像差是一个重要指标,系统最大像差小于 2%,人眼能分辨的像差量为 3%,最大场像差小于 0.8%,符合设计指标的要求。



(a) 点列图

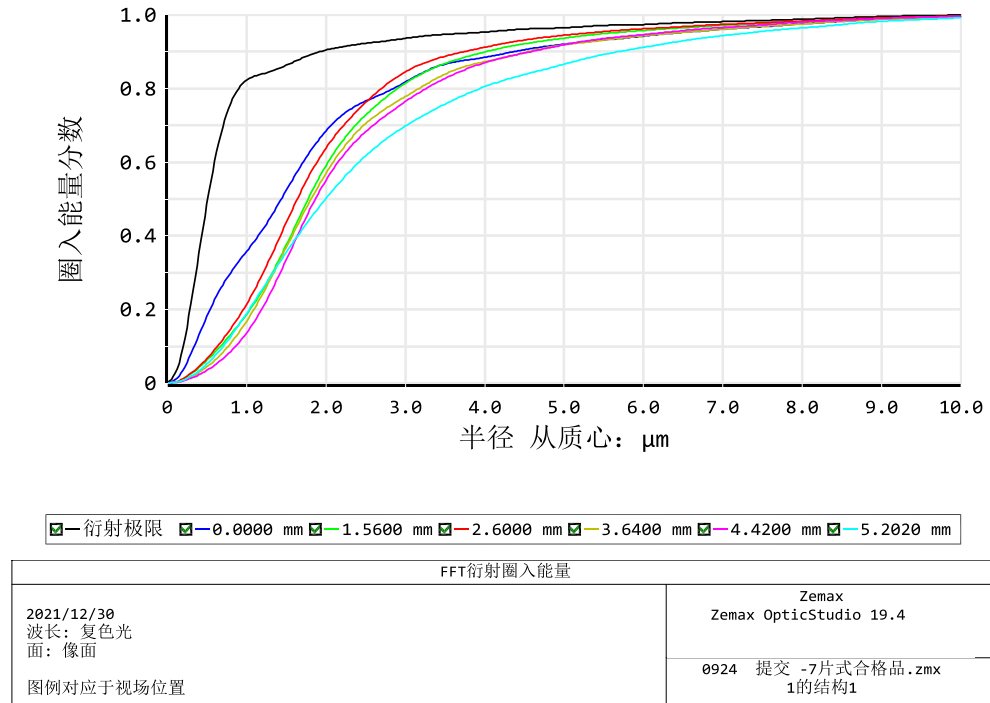


(b) 场曲和畸变图

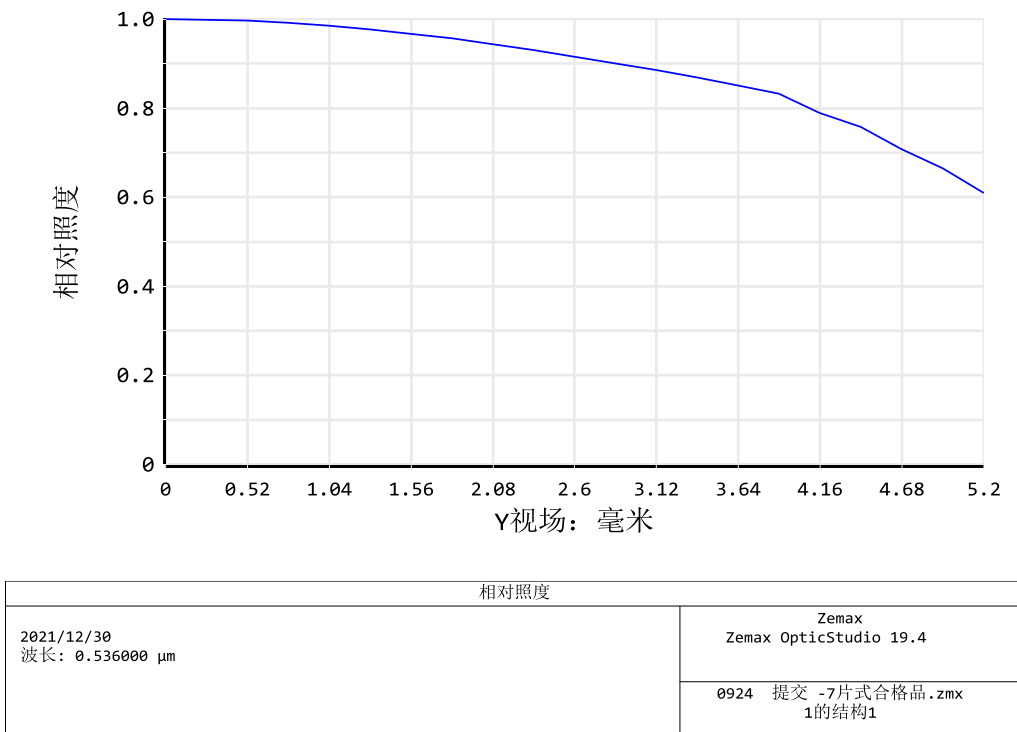
图 8 像差分析图

5.2 能量和照明分析

图 9(a)为光学系统的能量浓度曲线。LED 显示芯片尺寸为 $12.5\mu\text{m}$ ，当漫射点半径达到 $8\mu\text{m}$ 时，能量浓度在 60% 以上。图 9(b)为系统的相对照度，图 7(b)为不同视场下照度的均匀分布。



(a) 能量集中度图



(b) 相对照度图
图 9 能量和照明的分析图

6 公差分析

表 3 显示了系统的公差设置。使用 Zemax 进行公差分析后，系统在奈奎斯特频率下的 MTF 变化如表 4 所示。可以看出，光学系统的平均 MTF 高达 0.505，且系统对公差敏感。

表 3 光学系统中的公差范围

Parameter	Value
Radius (fringes)	N = 2
Thickness/ mm	0. 02
Decenter X/Y/mm	0. 02
Tilt X/Y (degrees)	0. 0083
S + A Irregularity (fringes)	$\Delta N = 0. 2$
Index of refractive	0. 000 1
Abbe number/%	1

表 4 光学系统中在 85lp/mm 处的 MTF

Parameter	Value
90% >	0.65877617
80%>	0.65761374
50% >	0.52957056
20% >	0.50526686
10%>	0.54541721

7 结论

在本文中，我们设计了一种以自发光微 led 阵列为显示光源的新型微投影系统，与传统的 DMD 微反射器系统或 LCOS 液晶光面板系统相比，它提高了能量利用率，减少了杂散光干扰。投影物镜由组合彩色棱镜和成像物镜组成，总长度为 63mm，全视场角为 66°。在空间频率为 85lp/mm 时的调制传递函数大于 0.5，像差小于 1%。该微型投影系统的设计为未来便携式、轻型、自照明微型投影仪的发展提供了参考和技术支持。

参考文献

[1] 代永平, 耿卫东, 孙钟林. LCoS 投影显示技术研究进展 [J]. 电视技术, 2003 (08): 34-37+56.

[2] 田志辉, 刘伟奇, 冯睿, 等. 激光投影显示系统薄型化设计 [J]. 液晶与显示, 2009, 24 (06): 916-921.

[3] 李丽娟, 孙佳慧, 林雪竹等. 激光 3D 投影技术研究 [C]//. 2013 国际工业设计研讨会暨第十八届全国工业设计学术年会论文集. 2013: 178-183.

- [4] 王睿, 江伦, 宋志化. 基于微型投影的集成式车载平显光学系统设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55 (11): 424-430.
- [5] 王显锋. 短焦微型投影系统的光学设计 [D]. 苏州大学, 2018.
- [6] 钱立勇. 基于LED的低成本微型投影系统光学设计与研究 [D]. 安徽师范大学, 2018.
- [7] 林正, 徐苗, 余华恩等. 广角微型投影镜头设计 [J]. 光学仪器, 2017, 39 (04): 49-53.
- [8] 冯思悦, 梁静秋, 梁中翥等. LED 微阵列投影系统设计 [J]. 中国光学, 2019, 12 (01): 88-96.
- [9] 陈琛. 曲面幕投影系统中非相似成像技术研究 [D]. 燕山大学, 2017.
- [10] 李维善, 陈琛, 刘宵婵等. 球幕投影数字鱼眼镜镜头的光学设计 [J]. 应用光学, 2016, 37 (01): 39-44.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] SAND A, RAKKOLAINEN I. Mixed reality with multimodal head-mounted pico projector [C]. Virtual Reality International Conference: Laval Virtual. 2013: 1-2.
- [15] 冯奇斌, 肖慧丽, 杨玲等. 用于超薄 MiniLED 背光模组的光学膜设计 [J]. 光学精密工程, 2021, 29 (11): 2548-2555.
- [16] 徐峰. MicroLED 显示技术发展概述 [J]. 数字通信世界, 2021 (05): 45-46.
- [17] 蒋春花. 浅析 CIE 1931 和 CIE 1976 中的 sRGB、NTSC 色域 [J]. 电子质量, 2018 (02): 54-56.
- [18] 刘钧, 高明. 光学设计 [M], 北京: 国防工业出版社. 2016.