

# 激光投影显示色均问题的仿真计算和实验研究

李克强, 郭宇杰, 谭桂林, 刘杰, 钟建  
(电子科技大学, 四川成都 610054)

**摘要:**针对激光投影出现的色均问题,本文首先对照明主体进行了设计,通过加入反射镜增加蓝光光程,缩短绿光光程,并在不同位置加入扩散片实现对色均的降低,并在此照明主体的设计之上,完成整体激光投影显示系统的设计,通过仿真搭建激光显示系统来研究三基色光源通过不同角度,类型,位置的动态/静态扩散片后所成图像的色均问题,并依据仿真结果进行实验。仿真以及实验结果表明,色均明显降低,搭配 Diffuser 2 高斯 2° 情况下色均小于 0.01,照度均匀性大于 93%,达到行业领先水平。

**关键词:**显示;激光投影;色均;照度均匀性

**中图分类号:**TN249;TN873 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.07.003

## Simulation calculation and experimental study of the colour homogeneity problem of laser projection displays

LI Ke-qiang, GUO Yu-jie, TAN Gui-lin, LIU Jie, ZHONG Jian  
(University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054, China)

**Abstract:** Aiming at the color uniformity problem of laser projection, the lighting body is designed in this paper. By adding reflectors to increase the blue light path and shorten the green light path, and adding diffusers in different positions to reduce the color uniformity, the design of the overall laser projection display system is completed based on the design of the main lighting body. The laser display system is built through simulation to study the color homogeneity of the image formed by the three primary color light sources through different angles, types and positions of dynamic/static diffuser, and the experiment is carried out according to the simulation results. The simulation and experimental results show that the color is significantly reduced, the color is less than 0.01 and the illumination uniformity is more than 93% under the Diffuser 2 Gaussian 2° collocation, reaching the industry leading level.

**Keywords:** display; laser projection; color uniformity; illumination uniformity

### 1 引言

投影显示技术主要分为阴极射线管(Cathode Ray Tube),液晶显示(Liquid Crystal Display),硅基显示(Liquid Crystal on Silicon),数字光处理(Digital

Light Processing)这四种类型<sup>[1-3]</sup>。其中DLP投影显示中使用激光投影是目前研究的热点之一。DLP激光投影显示因高利用率,高对比度、高亮度、寿命上、大色域、颜色鲜艳、还原度高、色彩丰富等优点,

**基金项目:**国家自然科学基金联合基金资助项目(No. U21A20492);四川省科技计划资助项目(No. 2022YFH0081; No. 2022YFG0012; No. 2022YFG0013)资助。

**作者简介:**李克强(1997-),男,硕士研究生,研究方向为光学工程。E-mail:386226571@qq.com

**通讯作者:**钟建,男,主要从事信息显示,光电子器件,传感器件,新能源及电路等技术研究。E-mail:zhongjian@uestc.edu.cn

**收稿日期:**2022-07-27; **修订日期:**2022-08-20

在市场中受到热捧<sup>[4-6]</sup>。

与此同时,激光投影也出现了很多问题,其中色均和散斑问题是激光显示的重大问题。色度不均匀的首要表现就是图案的不均匀,严重的地方可以看到一团一团的光斑,特别是投影系统切换到单色场观察时,图案各个地方严重不一致,有的地方色调特别突出显著<sup>[7]</sup>,如图1所示。其原因在于光束在照明系统中处理不均匀。激光是单色性光源,需要经过扩束、整形、匀场这三个过程中的光学设计,这几个环节都会影响色均匀性问题<sup>[8-11]</sup>。因此照明系统的设计直接影响着色均问题,需要特别注意照明系统对光束的扩束、整形、匀场处理。本文基于传统投影系统做出创新,设计新的照明方案,同时以扩散片为变量进行对照实验,可变条件为扩散片的位置,角度,类型,最终实验出最佳的搭配组合。与此同时,相比于传统 TIR 结构,本文使用 RTIR 结构设计,计算出其角度大小,设计该模型。匀光元件选择光棒,根据 DMD 的大小以及角度,计算出投影系统的光学扩展量,设计光棒的大小尺寸。将系统设计完成后,通过仿真以及实验验证,最终搭建激光投影显示系统,可以在系统光通量达到 1206 流明(lm)的情况下,实现色均小于 0.015,同时照度均匀性达到90%以上。

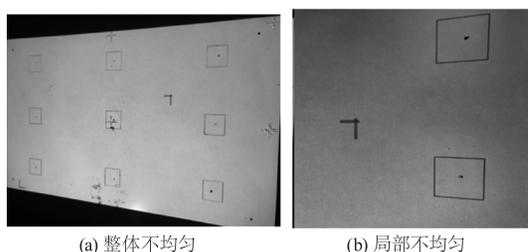


图1 色均质量展现

Fig. 1 Presentation of color average quality

## 2 激光显示系统设计

本文主要关注点是照明系统,研究照明系统对激光光束的作用,最终成像到屏幕上,直接观看图像质量。在这里首先计算系统中的一些重要参数,根据这些参数进一步设计出照明系统中重要元件参数,最后再模拟优化仿真,最后依据仿真结果去组装实验,得到最终的实验结果。

### 2.1 三刺激值与色坐标

在国际照明组织 CIE1931 的标准下,只要选用

的光源确定,那么就可以根据三刺激值计算得出显示色域大小<sup>[11]</sup>,并且激光光源的功率就可以按照一定的比例匹配合成确定的白光。根据色度学三刺激值与光谱功率分布之间的关系如式:

$$X = \kappa \int_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$Y = \kappa \int_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$Z = \kappa \int_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

式中,  $\kappa$  是调节系数,是一个常数,  $\phi(\lambda)$  是辐射亮度,  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  分别是单波长的刺激值,计算整体的三刺激值后,如式(4)、(5)、(6)所示,计算得到的  $x, y, z$  坐标即色点坐标值。

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (5)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (6)$$

根据使用的激光器,查找 CIE1931 标准色度光谱三刺激值表中所对应的三刺激值,代入公式,计算出用这三个波长的激光器合成等能白光的辐射亮度之比。这里做一个简化,因为使用的 639 nm, 643 nm 的两列红激光,计算时选择 640 nm 作为红光的三刺激值<sup>[12]</sup>,见表1。

表1 三刺激值计算

Tab. 1 Calculation of color tristimulus values

波长/nm	光谱三刺激值		
	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$
640	0.4479	0.1750	0.0000
525	0.1096	0.7932	0.0573
465	0.2511	0.0739	1.5281

假设其中辐亮度之比分别为  $A : B : 1$ , 根据表1数据,计算得出三刺激分别变为  $X = A \times 0.4479 + B \times 0.175 + 1 \times 0$ ,  $Y = A \times 0.1096 + B \times 0.7932 + 1 \times 0.0573$ ,  $Z = A \times 0.2511 + B \times 0.0739 + 1 \times 1.5281$ ,  $X = Y = Z$  解得  $A : B : 1 = 6.098 : 3.2444 : 1$ 。也就是各颜色的功率之比为  $A : B : 1 = 6.098 : 3.2444 : 1$ 。

2.2 RTIR 棱镜角度的计算

本文采用远心结构设计,同时 DMD 棱镜采用的是 RTIR 棱镜设计。TIR 棱镜是入射光线的入射角度大于临界角在棱镜上先发生全反射,进入 DMD,然后出射;但是 RTIR 棱镜的原理是入射光首先进入 DMD 调制,然后出射光的出射角度大于临界角在棱镜上发生全反射<sup>[13]</sup>。TIR 和 RTIR 结构如图 2 所示。

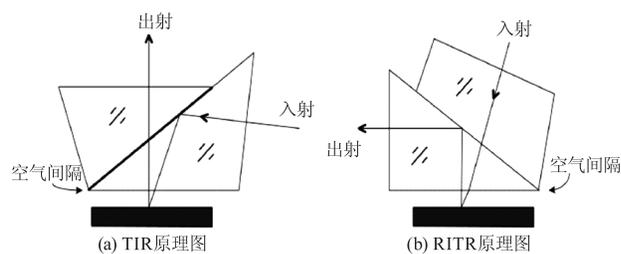


图 2 TIR 和 RTIR 结构

Fig. 2 Schematic diagram of TIR and RTIR structures

两种结构各有优缺点,TIR 结构光束的光程比较长,结构体积大,而 RTIR 反之。现在求解 RTIR 棱镜  $\alpha$  的角度大小。

如图 3(b) 所示,照明光束进入棱镜后在其下表面发生折射,出射光线入射到 DMD 上的角度为  $\theta_{DMD}$ ,根据折射定律:

$$\sin\theta = \frac{\sin\theta_{DMD}}{n} \tag{7}$$

光线在进入成像系统时棱镜的反射面上发生全反射,则变换为如式(8)所示:

$$\sin i = \sin i' = \frac{1}{n} \tag{8}$$

式中, $n$  为棱镜材料折射率,选用的是 OHARA 公司的 S\_TIH10,其中折射率为 1.734,  $\theta_{DMD}$  为 DMD 芯片翻转角度  $17^\circ$ 。RTIR 结构如图 3 所示。

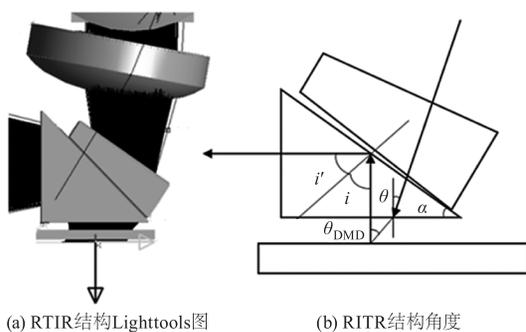


图 3 RTIR 设计与角度计算

Fig. 3 Design and angle calculation of RTIR structure

对棱镜  $\alpha$  的数学几何关系:

$$\alpha = i + \theta \tag{9}$$

得到  $\theta = 9.7^\circ; i = 35.3^\circ; \alpha = i + \theta = 45^\circ$ 。因此 RTIR 棱镜的角度为  $45^\circ$ 。

2.3 光学扩展量计算

光学扩展量与能量传输效率有很大关系,在整个光学系统中,如果计算光束经过每一个光学元件的光学扩展量,会有一个最小的光学扩展量。这个扩展量所代表的元件也就限制了能量的传递,即受光学调制器 DMD 所限制。如果光源的光学扩展量大于 DMD 的光学扩展量,光束经过 DMD 时,会有能量传输损失,造成光效率降低;如果 DMD 的光学扩展量大于光源的光学扩展量,虽然能量能很好传递出去,但是会造成 DMD 尺寸选择偏大,浪费 DMD 空间。综上,在设计光学系统的时候一定考虑光学扩展量的匹配,能最大化获得光能的同时,还不造成浪费<sup>[14]</sup>。

首先计算照明系统的  $F/\#$ ,光调制器的最大光锥角度为  $17^\circ$ ,所以也决定了该系统的焦数,焦数计算式:

$$F/\# = \frac{1}{2\sin\theta} = \frac{1}{2\sin 17^\circ} = F/1.71 \tag{10}$$

因为选用的是激光阵列激光器,那么计算 DMD 是 0.47 in 时,且根据 TI 相关说明书如表 2 所示,在 Lighttools 上设计该特性,如图 4 所示。

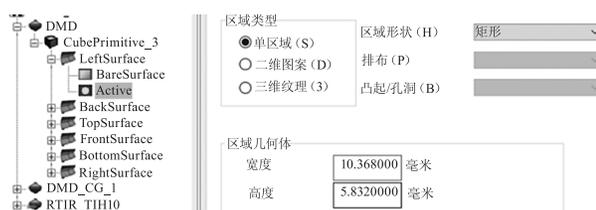


图 4 DMD 尺寸在 Lighttools 中设置

Fig. 4 Setting of DMD size in Lighttools

表 2 DMD 相关规格特性

Tab. 2 Relevant specifications and characteristics of DMD

Manufacturer	Texas Instruments
Type	4K TRP 2xLVDS, Series 316
Panel Size/in	0.47
Native Pixel	1920 × 1080 pixels
Pixel Size/ $\mu\text{m}$	5.4
Active Area/mm	10.368 × 5.832

那么根据有效区面积计算光学扩展量, 见式 (11):

$$E = n^2 \pi A \sin^2 \theta = \pi \times 10.368 \times 5.832 \times \sin^2 17^\circ = 16.24 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (11)$$

根据光扩展量匹配, 进入 Rod 的光学扩展量与它相同, 激光阵列需要进行扩束后经过聚焦透镜进入 Rod, 而 DMD 的倾斜角为  $17^\circ$ , 为了让 ON 状态与 Flat 状态光束分离, 照明光束要小于  $17^\circ$  (数值孔径调整为  $F/2.0$ ), 同时照明光束与 ON 状态分离要求照明光束入射角大于  $34^\circ$ , 但是根据棱镜的工作原理, 照明光束与 ON 状态光束必须大于全反射临界角, 为了避免全发射附近的低透过率区域, 照明光束主要光线采用的  $38^\circ$  入射。即入射角度  $\theta = 38^\circ$ , 计算如式:

$$\pi \times A_{\text{rod}} \times \sin^2 38^\circ = 16.2375 \quad (12)$$

$A_{\text{rod}} = 13.6363$ 。按照 DMD 的 Active Area 比例为 16:9, 而面积等于高乘宽, 假设宽为  $w$ , 则可以表达如式:

$$A_{\text{rod}} = w \times \frac{9}{16}w = \frac{9}{16}w^2 = 13.6363 \quad (13)$$

计算光棒 Rod 的宽度为 4.9236 mm, 高度为 2.7696 mm, 如图 5 所示。Rod 长度是根据反射定律计算的, 这里 Rod 采用内部空心, 四周为高反介质。假设入射角  $i$ , Rod 的高度  $h$ , 反射一次距离为  $Z = h \times \tan i$ , 那么在 Rod 里反射  $N$  次总长为  $z_t = N \times h \times \tan i$ , 假设 Rod 无限长, 那么光线分布就无限的均匀。光线的分布随着的距离长短影响均匀度, 为了达到合适的均匀度, 设定 Rod 的长度为 40 mm。

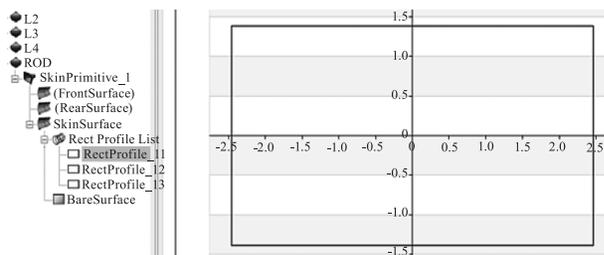


图5 ROD 尺寸设计图

Fig. 5 Dimension design drawing of ROD

### 2.4 聚焦透镜设计

将各路激光光束合光在一起后, 这个时候的光斑较大, 无法完美地送入光棒里, 这个时候就需要对

光束进行聚焦透镜设计, 这里的聚焦透镜采用两个透镜组, 分别是平凸透镜和凸透镜, 设计详情如表 3 所示。

### 2.5 照明系统设计

根据光学扩展量的计算可以得到光孔径大小, 相比与传统设计框架, 激光投影中的不同之处在于能量密度高, 光谱窄。如何将阵列激光三种颜色光汇合在同一主光轴上, 这是设计光路时需要考虑的。激光阵列中红激光是两个阵列, 而绿蓝激光分别是一个阵列, 如果不对红光处理, 就会有两个光轴, 绿光对人眼的感官影响是最大的, 所以设计时绿光应该尽可能的使用较短的光程, 而蓝光对人眼的感官是比较小的, 可以考虑将蓝光分离的更远, 使用较远的光程。

表 3 聚焦透镜属性

Table 3 Properties of the focus lens

单位/mm	len1	len2
直径	27	22
厚度	7	7.5
前表面曲率半径	25	12
后表面曲率半径	174	20.5
光学属性	透过率 100 %	透过率 100 %

由此产生了照明方案, 如图 6 所示, 将两列红光经过 R4 的反射, 分别作为光轴, 蓝光分离出去, 依次经过 R1、R2、R3 反射, 经过 SP (Spectroscope) 分光镜后, 分别通过 DM (Dichroic mirror) 二向色镜和 R5, 然后和两列红光汇合。绿光经过 SP 分光镜后

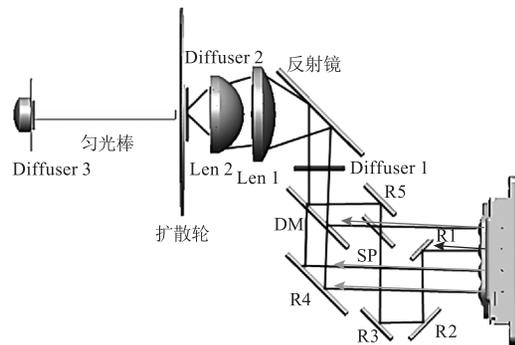


图6 照明方案 3D 设计图

Fig. 6 3D design drawing of lighting scheme

与蓝光混合成蓝绿光,然后都在 DM 与红光汇合。汇合后的光线经过反射镜和会聚透镜 Len1、Len2 后经过动态扩散片,进入 Rod 中匀光,后续进入 DMD 调制器中。其中三个静态扩散片 Diffuser 在使用是

只需要开启一个,其他两个禁用。

### 3 仿真及实验结果

#### 3.1 仿真参数设置

相关元件给出规格大小,如表 4 所示。

表 4 照明主体中光学原件参数

Tab.4 Parameters of optical elements in lighting body

类别	元件名称	规格/mm	材料	镀膜	损伤阈值/(kW·cm <sup>-2</sup> )
反射镜	R1	21×8.2×1	H-K9L	高反介质膜	>100
	R2/R3/R5	21×12×1			
	R4	21×24×1			
分光镜	SP	21×12×1		分光介质膜	
二向色镜	DM	21×24×1		滤光介质膜	
反射镜	M1	21×24×1		高反介质膜	
聚焦透镜	len1	Φ27		减反射膜	
	len2	Φ22			
光棒	Rod	40		高反介质膜	

其中,R1,R2,R3,R4,R5,M1 除开光接受面,其他面设置为光学吸收面,只有在光束接触面设置为反射面,光学属性设置为平滑光学,反射率为 100%,透过率和吸收率设置为 0。

SP 是分光元件,光学属性设置为对于任何波长的光一半透射,一半反射。DM 是带通滤波器,其中方案一中 DM 允许通过红色激光,而对其他颜色的光反射,其反射率如图 7 所示。

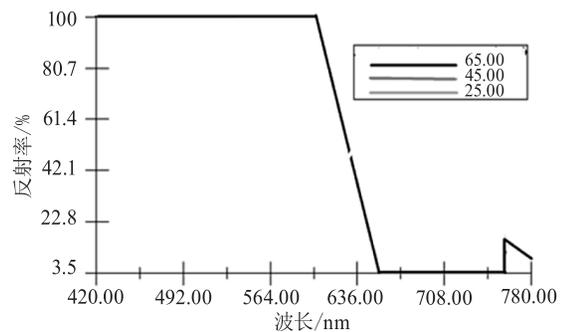


图 7 DM 光学属性

Fig.7 Optical properties of DM

#### 3.2 仿真结果

仿真结果如表 5 所示。

表 5 不同扩散片和高斯角度仿真结果

Tab.5 Simulation results of different diffuser and Gaussian angle

	照度均匀性		色均匀性				光效	
	9 点/%	13 点/%	9 点 Δx	9 点 Δy	13 点 Δx	13 点 Δy	Rod/%	屏幕/%
Diffuser1 (2°)	91.6	89.7	0.0051	0.0091	0.0055	0.0135	92.0	69.5
Diffuser1 (4°)	89.1	80.4	0.0066	0.0225	0.0097	0.0225	61.8	45.9
Diffuser2 (2°)	91.3	89.5	0.0058	0.0107	0.0073	0.011	97.0	73.1
Diffuser2 (4°)	88.7	88.7	0.0098	0.0148	0.0101	0.0148	97.0	71.6
Diffuser3 (2°)	90.8	90.8	0.0098	0.009	0.0098	0.0148	97.0	73.1
Diffuser3 (4°)	89.1	89.1	0.0086	0.0165	0.0103	0.0165	97.0	71.6

备注:每种仿真中都有动态 Diffuser,它的位置固定,扩散半角为高斯 5.5°。

从屏幕效率上看,Diffuser 1 的整体光通量偏低,不符合设计要求,而从 9 点的照度均匀性和整

个系统的光能利用率上看,Diffuser 2 高斯 2°和 Diffuser 3 高斯 2°的搭配最佳,Diffuser 2 高斯 4°和

Diffuser 3 高斯 4°是因为色均匀性太差。最终的结果可以看出,高斯 2°比高斯 4°更匹配对激光的扩束匀场作用。如图 8,图 9 给出了 Diffuser 2 高斯 2°的仿真结果。

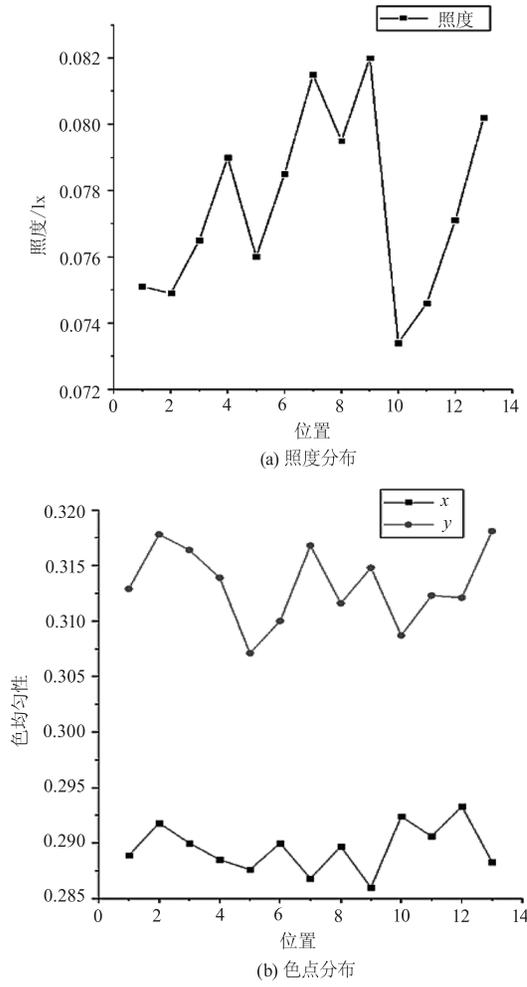


图 8 Diffuser 2 高斯 2°仿真结果

Fig. 8 Simulation result in Diffuser 2 Gauss 2°

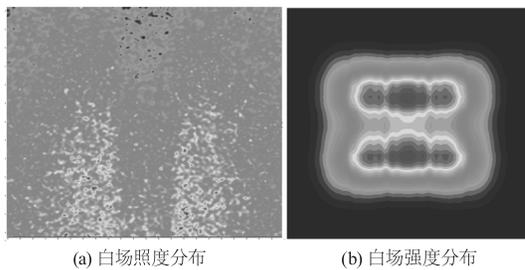


图 9 仿真效果图

Fig. 9 Simulation renderings

### 3.3 实验结果以及结论

依据前文设计的照明系统,最终仿真结果可以达到预期效果,进行实验测量。按照示意图安装,并且调试,加载相关电路板组装实验(如图 10 所示)。特别注意光路的搭建准则。角度,水平和准直需要

精细调整。其中厂家给的扩散片中有两种不同类型的扩散片,分别是高斯型,平顶型。平顶型扩散片是将激光转化为任意形状的统一光斑,特别是激光的  $M^2$  越大,均匀效果越好,散斑抑制明显。实验主要针对前文仿真效果较好的 Diffuser 2 高斯 2°与 Diffuser 3 高斯 2°组合。

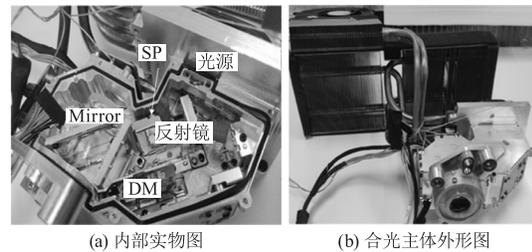


图 10 实物内部图

Fig. 10 Internal drawing of physical object

Diffuser 2 高斯 2°实验结果照度与色坐标数据如图 11 所示。

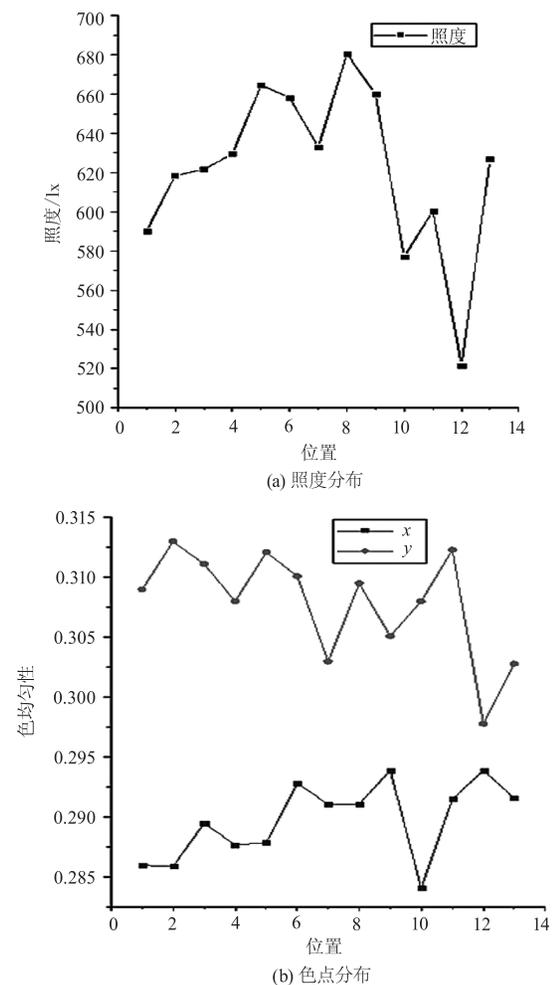


图 11 Diffuser 2 高斯 2°实验结果

Fig. 11 Experiment result in Diffuser 2 Gauss 2°

其中面积  $S = 1.8261 \times 1.032 = 1.885 \text{ m}^2$ ; 光通量为 照度面积 = 1206 lm, 计算结果如表 6 所示。

表 6 Diffuser 2 高斯 2° 实验结果

Tab. 6 Experimental result of Diffuser 2 Gauss 2°

	9 点	13 点
照度均匀性/%	96.25	93.56
$\Delta x$	0.008	0.010
$\Delta y$	0.009	0.009
对比度	1330	1330

最后, 在位置 3 即 diffuse3 位置分别使用高斯 2° 和高斯 4° 扩散片。Diffuser 3 高斯 2° 面积为  $S = 2.281 \times 1.278 = 2.9169 \text{ m}^2$ ; 光通量为  $F =$  照度面积 = 1095 lm, 计算结果如表 7 所示。

表 7 Diffuser 3 高斯 2° 实验结果

Tab. 7 Experimental result of Diffuser 3 Gauss 2°

	9 点	13 点
照度均匀性/%	92.67	88.06
$\Delta x$	0.021	0.022
$\Delta y$	0.011	0.026
对比度	1030	1030

使用 Diffuser 2 高斯 2° 扩散片的光通量最高达到 1206 lm, 色均匀性无论是 9 点还是 13 点都低于 0.01, 9 点照度均匀性高于 96%, 13 点高于 93%, 表现极其优秀。

#### 4 小 结

现代显示技术的优异直接决定人们获得信息的多少。在激光投影领域, 激光由于自身特性的优异, 成为众多光源中的首要选择<sup>[15-16]</sup>。激光单色性强, 形成的色域空间也大, 色彩表现力强, 颜色丰富, 能够达到人眼所能识别色彩空间的 90%, 可以更真实的实现色彩还原。本文对激光显示中的照明系统进行设计 DMD 尺寸大小计算出整个系统中光学扩展量, 因此, 进一步设计光学均匀棒 Rod 的大小尺寸。后续根据三刺激值计算得到三种光源的光学能量比。参考到激光阵列的位置, 本文想要把三基色激光整合在一起, 设计中需要不同类型的滤光片, 最终形成照明系统。在 Lighttools 上建模优化设计, 同时搭载 F/2.0 的投影镜头, 开启三基色光源, 进行色均匀模拟仿真。此过程中, 控制变量为扩散片: 不同位置, 不同度数以及不同类型的扩散片。

最终模拟结果表明搭载 Diffuser 2 和高斯 2° 的结果更优异, 其原因在于它尽可能将三基色的主光线汇入光路中, 使得后续光学元件如动态/静态扩散片和匀光棒更好的处理这些光线。

总的来说, 我们在原有激光显示投影系统的基础上进行了再设计, 在提高色均性的同时, 光通量并未受到较大影响, 同时照度均匀性也得到了提升。

#### 参考文献:

- [1] Xu Z, Bi Y. Large laser projection displays utilizing all-solid-state RGB lasers[J]. Light-Emitting Diode Materials and Devices, 2005, 5632: 115 - 122.
- [2] Yu X, Ho J, Tan L, et al. LED-based projection systems[J]. Journal of Display Technology, 2007, 3(3): 295 - 303.
- [3] Hager T, Eichler C, et al. Power blue and green laser diodes and their applications [C]//Novel In-Plane Semiconductor Lasers XII. International Society for Optics and Photonics, 2013, 8640: 86400G.
- [4] Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based displays: a review[J]. Applied Optics, 2010, 49(25): 79 - 98.
- [5] Balci M H, Chen F, Cumbul A B, et al. Comparative study of blue laser diode driven cerium-doped single crystal phosphors in application of high-power lighting and display technologies[J]. Optical Review, 2018, 25(1): 166 - 174.
- [6] Chen H W, Lee J H, Lin B Y, et al. Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives [J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(3): 17168.
- [7] Morris S M, Hands P, Findeisen-Tandel S, et al. Polychromatic liquid crystal laser arrays towards display applications[J]. Optics Express, 2008, 16(23): 18827 - 18837.
- [8] Lee C T, Cheng C, Lee H Y, et al. Color conversion of GaN-based micro light-emitting diodes using quantum dots [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(21): 2296 - 2299.
- [9] Zhang J Y, Liu W, Wei Z L, et al. Color system construction based on laser display[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2006, 56(9): 307 - 316.
- [10] Firehammer J A, Crawford G P, Lawandy N M. Voltage-controlled lasing pixels for projection display[J]. Applied

- Physics Letters,1998,73(5):590-592.
- [11] Yuan Y,Wang D,Zhou B, et al. High luminous fluorescence generation using Ce:YAG transparent ceramic excited by blue laser diode[J]. Optical Materials Express, 2018,8(9):2760.
- [12] Wang D Z,Yan B X,Bi Y, et al. Three-wavelength green laser using intracavity frequency conversion of Nd:Mg:LiTaO<sub>3</sub> with a MgO:PPLN crystal[J]. Applied Physics B, 2014,117(4):1117-1121.
- [13] Zhong Yan. Optical design of the laser projection system based on DLP technology[D]. Changchun:Changchun University of Technology,2016:24-38. (in Chinese)  
钟岩. 基于DLP技术的激光投影系统光路设计[D]. 长春:长春理工大学,2016:24-38.
- [14] Liu Zhenjie. Research on DLP catadioptric ultra short focal projection light engine system illuminated by LED light source [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 15-22. (in Chinese)  
刘振杰. LED光源照明DLP折反射超短焦投影光引擎系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2016:15-22.
- [15] Xu Zuyan. Laser displays-new display technology for next generation. [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(5): 737-741. (in Chinese)  
许祖彦. 激光显示——新一代显示技术[J]. 激光与红外,2006,36(5):737-741.
- [16] Hao Li,Zhang Yue,Liu Weiqi, et al. Speckle suppression in laser display [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(10): 927-930. (in Chinese)  
郝丽,张岳,刘伟奇,等. 激光显示中散斑的抑制[J]. 激光与红外,2006,36(10):927-930.