

基于散斑抑制方法的半导体激光显示系统实现

郭宇杰, 李国强, 张嵩, 权志豪, 钟建
(电子科技大学, 四川成都 610054)

摘要:在显示技术不断发展的今天,随着对于激光技术的深入研究,激光显示的优势逐渐得到体现。激光作为光源具有很好的单色性极很窄的光谱线宽,这些特点使得激光成像的颜色饱和度高,显示的颜色数多,比传统光源有着更宽的色域,并且在画面亮度的方面也更有优势。然而由于激光光束高度相干性而产生的激光散斑,会降低图像的质量。因此,对于激光散斑和散斑抑制的研究工作是激光显示领域研究的一个重点。文中我们设计了一种激光投影照明系统,该系统使用的光学元件结构简单,占用空间小,可以很好地运用于投影仪的设计和使用中并保持良好的光效。系统中针对激光散斑的成因设计了一种复合型的散斑抑制方案,这种消散斑方法可以将白场的散斑对比度从0.132降低至人眼识别极限以下的0.042。

关键词:激光显示;散斑抑制;激光投影照明

中图分类号:TN249;TP334.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.005

Implementation of a semiconductor laser display system based on a scatter suppression method

GUO Yu-jie, LI Ke-qiang, ZHANG Song, QUAN Zhi-hao, ZHONG Jian
(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: With the continuous development of display technology, the advantages of laser display have been gradually reflected with the in-depth research on laser technology. The laser as a light source has excellent monochromatic properties and a very narrow spectral line width which makes the laser imaging highly saturated, displaying a larger number of colors, a wider color gamut than traditional light sources and an advantage in terms of picture brightness. However, laser scatter due to the high coherence of the laser beam can reduce the quality of the image. Therefore, the study of laser scatter and scatter suppression is a major focus of research in the field of laser displays. In this paper, a laser projection lighting system that uses simple optics, takes up little space and is well suited to the design and use of projectors and maintains good light efficiency. In this system, a compound scatter suppression scheme is designed to address the causes of laser scatter. This scatter suppression method can reduce the scatter contrast of white field from 0.132 to 0.042 below the recognition limit of human eyes.

Keywords: laser display; scatter suppression; laser projection illumination

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:郭宇杰(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光显示,光电子器件等。E-mail:274678289@qq.com

通讯作者:钟建(1972-),男,博士,教授,主要研究方向为激光显示,光电子器件等。E-mail:zhongjian@uestc.edu.cn

收稿日期:2022-07-17;**修订日期:**2022-08-19

1 引言

显示技术是我们获得图像信息的一种基本手段,其作为信息技术的重要组成部分已历经了很多阶段。随着光学研究和信息技术的进一步发展,显示技术已经逐渐走向超高清数字化显示和更广色域显示的方向^[1]。现在显示行业中使用较多的是宽光谱光源,色域覆盖率难以提高^[2]。而激光作为一种拥有极窄光谱的光源,运用到显示技术中可以达到传统色域的两倍以上,同时其高颜色饱和度也可以使显示的图像更加生动逼真。并且激光方向性好^[3-4],拥有极小的发散角度,可以获得其他显示技术难以获得的极高的分辨率。所以激光显示技术正在逐渐成为行业研究的热点和主流。

在激光显示的发展过程中,最关键的就是激光光源的发展,目前最新的技术是使用三基色 LED 作为光源^[5]。三基色激光光源分别通过棱镜耦合后在合光光路中合成一束激光,再经过显示和成像进行投影显示。这种方式的缺陷在于,由于激光光源自身的相干性,在成像后会出现激光散斑,降低图像的质量。这是因为相对于激光极窄的线宽,物体表面的涨落很大,激光光束照射在物体表面时,就相当于高度相干光束在粗糙的平面上发生散射和反射,此时可以将物体表面看作无数的反射面元,大量面元的反射光线在空间上发生干涉,导致了画面上出现明暗的颗粒状图样,这就是激光散斑。由于散斑是干涉的结果,干涉相涨时产生的是亮点,干涉相消时产生的是暗点。

散斑的出现让激光显示的发展受到了影响,但是激光大色域和高方向性的优势和特点在显示技术方面的应用是其他光源所达不到的,因此提出激光散斑的抑制方法,就可以让激光光源可以更好地运用于显示技术中。

2 动态叠加实现散斑抑制

动态方式抑制散斑,其原理是一种时间平均的消散方法,通过动态元件让独立散斑实现叠加,达到抑制散斑的目的。一种常用的散斑抑制方法是在光路中加入漫反射体,这些漫反射体器件以一定的频率进行位移或者形变,改变激光光束的出射角度,实现了角度的多样性,产生独立非相关的散斑图样,后续的光学系统将这些图样叠加起来,达到抑制散斑的结果^[6-9]。角度的多样性也有其他方式可以获

得,有研究者在光路中加入光纤并施加一定频率的振动,使光纤出射光的照明角度发生改变,也有直接将振动的光学器件放置在光源之后,以此获得角度多样性^[10-12]。S. Lowenthal 等研究者设计了一种双扩散器的光学系统,包括两个扩散器,一个静止,一个移动,实现了对散斑的抑制^[13]。

散斑抑制的手段非常丰富,但是每一种抑制手法往往有它的不足之处,在实际的应用中,通常需要在考虑系统设计的复杂程度和实用性的基础上,使用多种手段混合的方案降低散斑对比度。

在激光显示领域中,最常使用散斑对比度 C 这一评估标准来衡量激光散斑^[14],散斑对比度定义为:散斑图像中,光强度大小的变化与其平均值之间的比值。

$$C = \frac{\sigma_I}{\bar{I}} \quad (1)$$

其中, \bar{I} 是散斑强度图样的平均值; σ_I 是散斑图样强度的标准差。

随着 C 的增大,散斑变明显,图像的颗粒感变强,图像的质量降低。人眼能够识别的散斑对比度阈值为 0.04,当散斑对比度小于 0.04 时,人眼就观察不到散斑^[15]。

Goodman 教授提出的“随机行走”理论^[16],通过描述复分量在随机振幅和随机相位的叠加,展示了散斑产生的基本情况。每一个信号都是由多个复分量合成的,这些附带振幅和相位的复分量干涉叠加后就会出现散斑。把这些复分量在复平面上表示,可以具有随机的长度和随机的方向,也就是复振幅是随机的振幅和随机的相位。复分量的叠加会出现合成向量的长度变长或者变短的情况出现,这也反映了干涉的相长和相消两种情况。

我们可以用数学方式来表达空间中某一点的随机向量叠加,表达式如下:

$$A = Ae^{j\theta} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n e^{j\theta_n} \quad (2)$$

获得独立散斑图样的叠加可以有多种方式,使用波长和照明角度不同的光束实现相位和振幅的多样性,利用偏振光的正交性,或者直接使用不相关的两个或多个光源都可以获得独立图样。

以随机行走中复分量的叠加公式为基础,推导得到 N 个独立不相关的散斑图样叠加的散斑对比度:

$$C = \frac{\sigma_s}{I_s} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N \bar{I}_n^2}}{\sum_{n=1}^N \bar{I}_n} \quad (3)$$

特别的,当这 N 个散斑图样的强度大小相等时,散斑对比度:

$$C = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,随着 N 的增大,即参与叠加的独立不相关的散斑图样的数量越多,散斑对比度越小,散斑对比度和图样数量呈反比,这一重要结果为我们后续研究抑制散斑对比度的手法提供了理论的基础。

3 散斑抑制方法的设计

3.1 激光投影系统设计

为设计出一种能适用于市场上投影电视系统的散斑抑制方案,我们考虑到方案与投影照明系统的契合性和方案本身的简便性,实验利用简单的透镜装置实现了将合光光路的光线汇聚到匀光棒中,进而通过图像处理 and 投影镜头传输到屏幕上。合光光路之后,透镜之前的位置是 diffuser1,透镜之后、匀光棒之前的位置是 diffuser2,匀光棒之后的位置是 diffuser3。

将我们设计的三基色激光光源的合光光路在 Lighttools 软件中完成建模,如图 1 所示。其中各个反射镜片、透镜所使用的材料均为 H-K9L 玻璃。

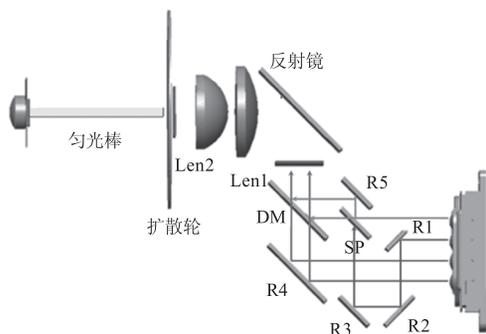


图 1 合光和照明系统光路的 Lighttools 建模
Fig. 1 Lighttools modeling of light paths for composite and lighting systems

在完成了实验设计的建模之后,将设计好的光学系统搭建在 DMD 芯片系统和投影镜头系统中,就得到了一个完整的投影仪系统。实验中所用到的散斑抑制方法,包括扩散轮,扩散片等器件均在合光照明系统中体现,因此实验和分析的重点是合光照

明部分。

3.2 基于 Lighttools 的实验模拟

根据设计方案在 Lighttools 软件中设置好器件的材料,尺寸和相关参数,添加到对应的位置,即可通过软件的光线追迹功能对设计方案的可行性进行模拟。本实验在 Lighttools 中的光线追迹追迹数目为五百万条。

我们在追迹光线后,打开 DMD 处接收器以得到模拟的 DMD 芯片上的光线分布情况。从结果可以看到,激光光源经过了合光光路和我们设计的光学系统后在 DMD 上形成了一个照度均匀的方形光斑,该光斑中心强度最高也是最均匀的部分可以覆盖模拟的 DMD 芯片,如图 2 所示。

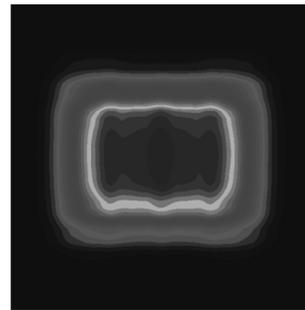


图 2 DMD 接收器上的光斑情况
Fig. 2 Spot condition on the DMD receiver

分析光线经过 DMD 芯片处理后,通过投影镜头打在屏幕上的分布情况。这时需要用照度均匀性分析的方法,本实验中使用的是 ANIS 流明测试中的十三点选取法,如图 3 所示。在屏幕端接收器上按照图中方法选取十三个测试区域,分别测量其中心点处的照度值表示该区域平均照度值,十三点的照度均匀性 = 照度最小值/照度最大值。

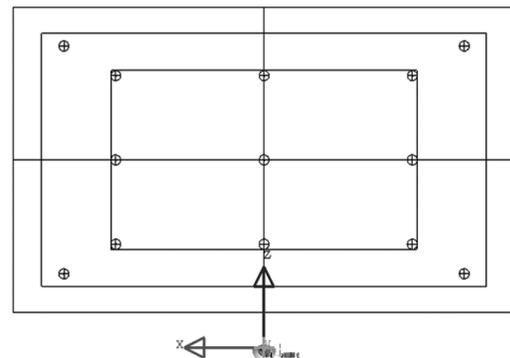


图 3 屏幕端十三点接收器的建立
Fig. 3 The establishment of the thirteen-point receiver on the screen

为了研究设计方案对激光散斑的改善效果,我们需要了解在元器件参与光线追迹前后屏幕端的散

斑情况。通过器件和光源的打开和关闭进行仿真,得到屏幕接收器的光强分布三维图样,以观察散斑的改善情况。首先关闭扩散轮和扩散片的追迹,分别对白场(W)、红场(R)、绿场(G)、蓝场(B)进行光线追迹,得到光强三维图样如图4示。

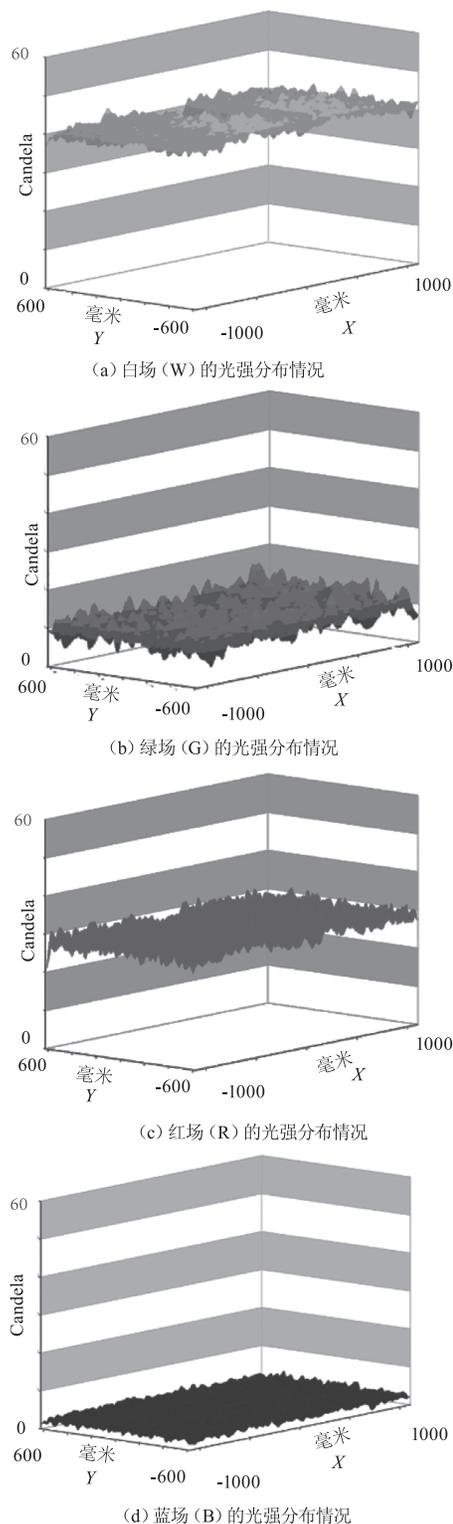


图4 初始条件下W,R,G,B的光强分布图样
Fig. 4 Light intensity distribution pattern of W,R,G,B under initial conditions

图4中(a)、(b)、(c)、(d)分别是白场(W)、红场(R)、绿场(G)、蓝场(B)的光强分布情况,根据公式(1),散斑对比度和光场图样的光强标准差成正比,从图中模拟结果可以看出,未经过消散手法处理的投影光场各处的光场差异很大,即光强标准差很大。

接着我们验证扩散元件对散斑对比度的影响。先后开启扩散轮和扩散片的光线追迹,分别模拟四种情况下的光强分布,并将模拟结果进行对比。模拟条件为扩散轮 5.5° ,扩散片位置为diffuser1,高斯型扩散片角度 2° 。白场的对比结果如图5所示,(a)是初始的状态,(b)是开启了动态扩散轮的结果,其光强的分布差异变小,分布更加其中,图像趋于平缓,(c)是在(b)基础上开启了扩散片的结果,可以看到图像更加平缓。从模拟结果趋势可以看出,随着扩散元件的加入,屏幕端接收器上的图像更加平滑,光强分布差异更小,光强标准差进一步降低,和预期相符,为后续实验提供基础。

我们对扩散元件加入前后的照度均匀性进行测量得到,初始状态下,屏幕端的照度均匀性为84%,光通量为1088 lm,开启一个扩散角度为 5.5° 的扩散轮之后,照度均匀性提升到85%,光通量提升到1108 lm,从diffuser1位置打开一块扩散角度为 2° 的高斯型扩散片,照度均匀性提升到88%,光通量提升到1125 lm,结果如图6所示。

从以上数据可以看出,静态和动态扩散器件的加入可以使得光路中的光束成像更均匀,光强的分布更平缓,投影系统的光通量也有3%的提升,证实了本方案的可行性。为了研究本方案对散斑情况的改善,我们需要搭建投影系统进行测试。

3.3 消散斑实验和数据分析

在本实验中,使用了一套激光散斑测量的软件系统,使用相机直接拍摄投影完整画面或者局部画面,将获得的照片导入软件即可直接计算得到图样的散斑对比度。该方法可避免人眼直接观测激光图样从视觉上带来的误差。

在实验之前需要对相机到屏幕的距离、镜头的通光孔径、相机的光圈F、积分时间、像素尺寸等参数进行测量,确保对于散斑的测试在一个合理的条件下进行。实验中测量散斑对比度的软件界面如图7所示。

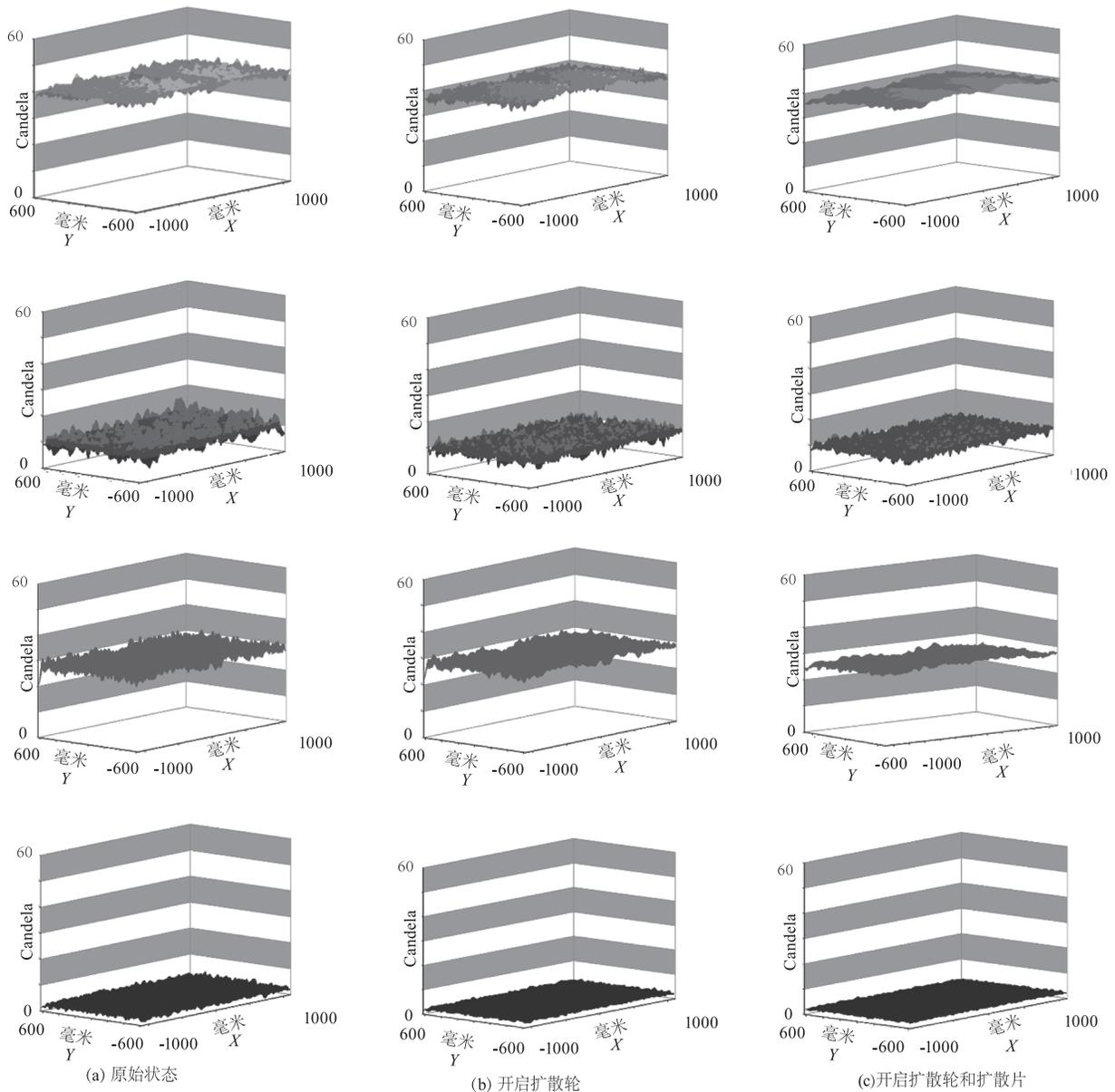


图5 白场(W),红场(R),绿场(G),蓝场(B)加入扩散原件后的光强分布

Fig.5 White field(W),red field(R),green field(G),blue field(B) light intensity distribution after adding the diffused original

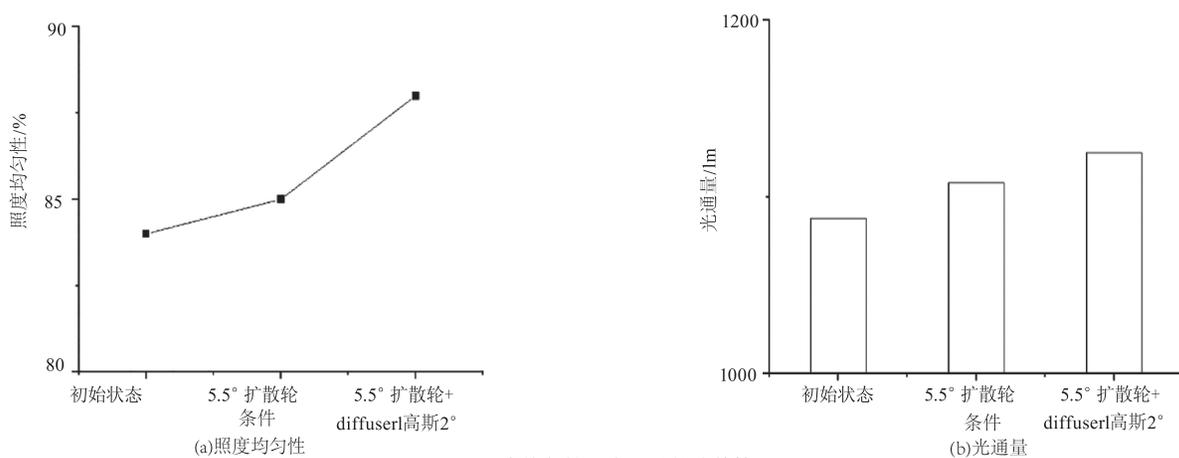


图6 照度均匀性和光通量的改善情况

Fig.6 Improvements in illuminance uniformity and luminous flux

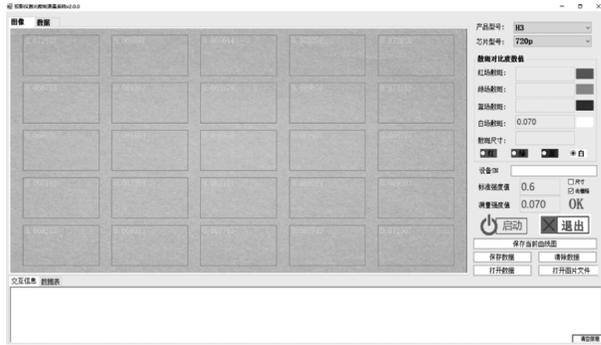


图7 散斑对比度计算软件界面

Fig. 7 Software for speckle contrast calculation

该计算软件可以对四个色场的散斑图样直接进行灰度分析处理和散斑计算,输出散斑对比度和散斑尺寸大小。

对四个色场的散斑对比度进行计算,改善效果如图8所示。从测量结果可以看出,在单色场中,红色激光由于波长最长,其散斑对比度最大,这与Lighttools中的仿真情况吻合。运动的扩散轮将三个色场的散斑对比度从0.323,0.201,0.052降低至0.258,0.152,0.045,改善程度达到20%,24%,13%,白场对比度从0.132降低至0.098,改善了26%,有明显的改善效果。另外,三个色场初始状态的对比度就在0.5以下,处于一个比较低的水平。这是因为投影系统光路中的匀光棒对激光光束有匀光的效果,光斑的均匀性已经得到了初步改善,所以初始状态的散斑对比度偏低。

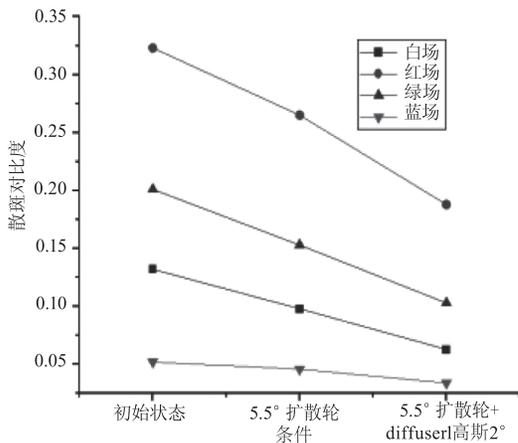


图8 扩散元件对散斑对比度的改善效果

Fig. 8 The improvement effect of diffusion element on speckle contrast

在初始状态下,白场的散斑对比度C为0.132,添加了扩散轮后降低了0.034,再次加入扩散片后对比度又降低了0.035,变为0.063,说明扩散器件对散斑状态有着良好的改善作用。对比度为0.132

时,人眼可以从投影画面观察到非常明显的颗粒状亮点,当对比度降低至0.063后,亮点明显减少,对画面的影响已经不大,但是人眼依然能够观察到散斑,因此我们需要通过实验做进一步的改善。

4 扩散片角度对消散斑的影响

进一步对散斑的改善进行研究,我们将方案目前使用的扩散角度为2°的高斯型扩散片更换为平顶型扩散片或者更换扩散角度,探究最合适的扩散片类型。高斯型扩散片的扩散角度满足高斯分布,而平顶型扩散片的扩散角度属于均匀分布。

在原条件下更换不同角度的扩散片,测量散斑对比度的变化情况。首先将diffuser1处高斯2°的扩散片分别替换成高斯2.5°,3.5°,5.5°的扩散片,测量得到的结果如图9所示。

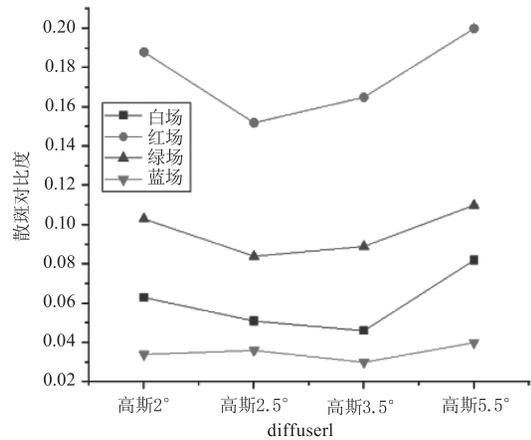


图9 不同角度高斯型扩散片对散斑对比度的改善效果

Fig. 9 The improvement effect of different angle Gaussian diffuser on speckle contrast

更换了高斯型扩散片的角度之后,红场和绿场的散斑对比度在高斯2.5°扩散片的时候达到最低的0.152,0.084,白场的散斑对比度在高斯3.5°的时候达到最低的0.046,散斑状况已经有很大改善,散斑对屏幕画面的影响程度在人眼观察能够接收的范围内,但是这个效果还有望得到进一步提升。

为了解不同扩散角度的扩散片对屏幕端照度均匀性的改善程度,我们分别对各实验组的十三点照度进行了测试,根据测试数据计算得到高斯2°,高斯2.5°,高斯3.5°,高斯5.5°对应的照度均匀性分别是88%,87%,89%,86%。从数据可以看出,高斯2°,2.5°,3.5°对均匀性影响不大,其中3.5°的扩散片均匀性相对最好,有5%的提升,5.5°扩散片对画面均匀性的改善效果最差,只有2%的提升。

2°的扩散片对系统光通量的提升达到 3 % ,但是随着扩散角度的增大,画面光通量几乎没有变化。不难发现在散斑对比度最低(0.046)的高斯 3.5°条件下,照度均匀性也达到最好的 89 % ,即投影仪光路系统的均匀性与投影画面的散斑改善状况正相关。不同角度扩散片照度均匀性和光通量的对比如图 10 所示。

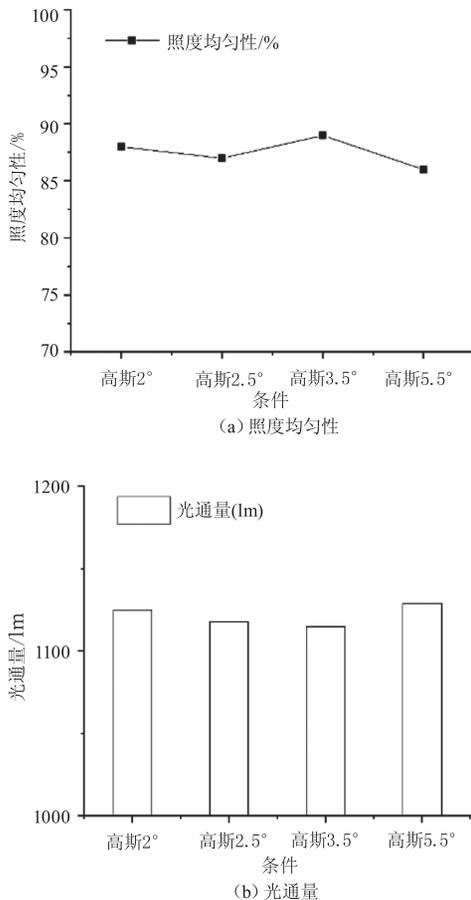


图 10 不同角度高斯型扩散片结果分析

Fig. 10 Result analysis of Gaussian diffuser with different angles

同样的,我们将扩散片替换成平顶型 3°,4°,5°,6°,7°,8°的扩散片,使用散斑测量仪器将散斑对比度的测试结果记录如图 11 所示,四个色场的散斑对比度变化趋势一致。红场的散斑对比度分别是 0.155,0.13,0.152,0.183,0.209,0.222,在平顶型 4°的时候最低为 0.13,在平顶 8°的时候最高为 0.222,可以发现对比度最低值相对于初始状态降低了 0.193,有很大程度的改善,并且相对于高斯型 2.5°的最佳情况也降低了 0.022。此时平顶型 4°的扩散片测得白场散斑对比度最低值为 0.042,已经接近人眼能识别的散斑对比度的极限值,画面的颗粒感基本消除。

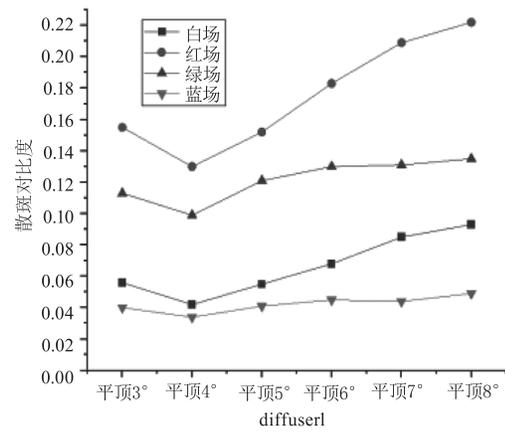
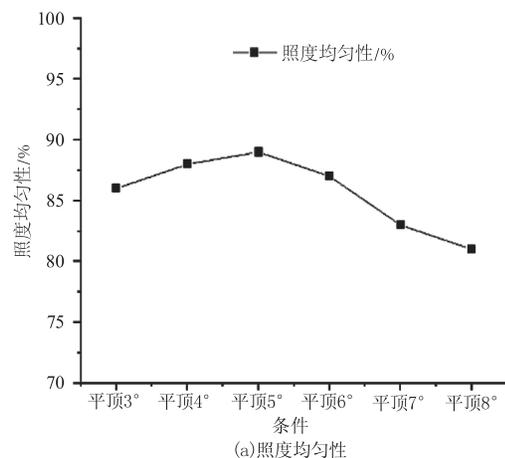


图 11 不同角度平顶型扩散片对散斑对比度的改善效果

Fig. 11 The improvement effect of different angle flat top diffuser on speckle contrast

平顶型 3°,4°,5°,6°,7°,8°扩散片的照度均匀性和光通量的对比数据如图 12 所示。根据所测数据可得,使用平顶型 3°,4°,5°,6°,7°,8°扩散片的照度均匀性分别为 86 % ,88 % ,89 % ,87 % ,83 % ,81 % ,当角度为 4°,5°,6°时,照度均匀性效果较好,在 5°时取得最大值 89 % ,而随着扩散角度继续增大,照度均匀性降低。同样地,我们计算出对应的画面光通量大小分别为 1167 lm,1182 lm,1161 lm,1157 lm,1141 lm,1116 lm,当扩散角度合适时,照度均匀性与屏幕光通量均保持良好,当扩散角度过大,光线的出射角度过大,部分光线没有汇聚在 DMD 芯片上,发生光通量损失,平顶型 8°扩散片的光通量仅为 1116 lm,光通量损失达 5.6 % 。

使用平顶型 4°的扩散片时,光通量达到最高的 1182 lm,照度均匀性 88 % ,白场散斑对比度为 0.042,相对于无扩散片的状态改善了 57 % ,该条件是 diffuser1 处使用扩散片对散斑改善的最佳条件。



(a)照度均匀性

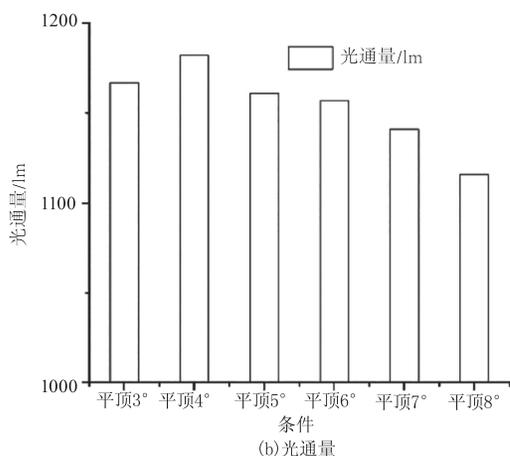


图 12 不同角度平顶型扩散片结果分析

Fig. 12 Result analysis of flat-top diffuser with different angles

5 结论

本文针对激光投影系统中的散斑问题,首先介绍了投影系统的设计,并设计出了一种简便的,可以适用于任意投影合光光路的散斑抑制方案。通过在软件 Lighttools 中建模仿真,验证了这一设计在实际投影仪系统中的可行性。接下来,通过实验首先测量了扩散轮与扩散片对散斑状态的改善程度,然后换用不同扩散角度的高斯型扩散片与平顶型扩散片进行对照实验,发现在 diffuser1 处放置扩散片可以对散斑有良好的改善作用。实验对各种条件下的照度均匀性和光通量进行了测试及分析,证明了在照度均匀性更好的条件中,散斑的改善情况也更好。本文所设计的激光投影系统可在保证投影光通量不损失的情况下,将白场的散斑对比度改善 68%,从 0.132 降低至人眼识别极限以下的 0.042。该系统的实现,可以帮助激光光源更好地运用于显示技术中。

参考文献:

- [1] Xu Zuyan. Laser displays-new display technology for next generation[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(S1): 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(S2): 737 - 741.
- [2] Gribkovskii V P. Injection lasers[J]. Progress in Quantum Electronics, 1995, 19(1): 41 - 88.
- [3] Baker C E. Laser display technology[J]. IEEE Spectrum, 2009, 5(12): 39 - 50.
- [4] Mairnan T H. Stimulated optical radiation in ruby [J]. Nature, 1960, 4736: 493 - 494.
- [5] Wang B. Study on theory and application of laser speckle field phase singularities[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
王斌. 激光散斑场相位奇异理论及应用研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [6] Trisnadi J I. Hadamard speckle contrast reduction [J]. Optics Letters, 2004, 29(1): 11 - 13.
- [7] Wang L, Tschudi T, T Halldórsson, et al. Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements[J]. Applied Optics, 1998, 37(10): 1770 - 1775.
- [8] Guangmin O, Zhaomin T, Nadeem A M, et al. Speckle reduction using a motionless diffractive optical element[J]. Optics Letters, 2010, 35(17): 2852 - 2854.
- [9] 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.
- [10] Le Z, Lapchuk A, Gorbov I, et al. Theory and experiments based on tracked moving flexible DOE loops for speckle suppression in compact laser projection [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 124: 105845.
- [11] Peled I, Zenou M, Greenberg B, et al. MEMS based speckle reduction obtain by angle diversity for fast imaging[J]. Rinsho Ketsueki, 2009, 45: 1 - 2.
- [12] Sun M, Lu Z. Speckle suppression with a rotating light pipe[J]. Optical Engineering, 2010, 49(2): 193 - 213.
- [13] D Joyeux, Lowenthal S. Speckle removal by a slowly moving diffuser associated with a motionless diffuser[J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(7): 847 - 851.
- [14] Redding B, Allen G, Dufresne E R, et al. Low-loss high-speed speckle reduction using a colloidal dispersion[J]. Applied Optics, 2013, 52(6): 1168 - 1172.
- [15] Kinoshita J, Aizawa H, Takamori A, et al. Angular dependence of screen speckle and fiber speckle of coupled output of nine high-power blue laser diodes through a multi-mode fiber [J]. Optical Review, 2015, 23(1): 1 - 12.
- [16] Wallhead I, Oca A R, P Quinzá. Designing a laser scanning picoprojector. part 1: characteristics of the optical displaying system and color-management-related issues [J]. Applied Optics, 2012, 51(20): 4803.