

LED 投影光源的色度学特性研究

赵 星[†] 方志良 母国光

(南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

(2006 年 8 月 14 日收到, 2006 年 9 月 13 日收到修改稿)

利用色度学理论计算分析了传统弧光灯投影光源和 LED 投影光源两个实例的色度学特性, 与传统弧光灯投影光源相比, LED 投影光源具有更高的光谱能量利用率和更加丰富的色彩表现能力, 完全符合数字投影机使用的 sRGB 彩色规范. 采用时序脉冲驱动的单色 LED 作为投影光源能够在不牺牲色彩饱和度的情况下获得更高亮度的投影显示. 因此 LED 可以替代传统的弧光灯光源以满足投影显示的色度特性要求.

关键词: 色度学特性, 投影光源, LED, 投影显示

PACC: 0760D, 4272

1. 引 言

随着近年来半导体发光材料的发展, LED 在各种照明领域越来越受到众人的瞩目, 尤其是大功率高亮度 LED 的发展则成为新一代民用照明的发展趋势^[1]. 考虑到 LED 体积小、能耗低等优点, 人们正努力开展研究以使用 LED 替代传统投影装置中的超高压汞灯作为新型投影光源^[2]. 然而使用 LED 这种新型固体光源, 不仅要考虑亮度及系统效率等光学系统设计问题, 还需要考虑这种新型光源是否能够满足彩色投影显示的要求. 为此, 本文通过与传统投影光源进行比较和分析, 研究了 LED 这一新型投影光源的色度学特性.

2. 色度学基本理论

根据色度学的理论, 可以利用

$$\begin{aligned} X &= \sum S(\lambda)\tau(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda, \\ Y &= \sum S(\lambda)\tau(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda, \\ Z &= \sum S(\lambda)\tau(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda; \end{aligned} \quad (1)$$

和

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z}, \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z &= \frac{Z}{X+Y+Z}, \\ x+y+z &= 1, \end{aligned} \quad (2)$$

计算某种颜色的三刺激值和色度坐标^[3]. 其中, X, Y, Z 为该颜色的三刺激值, $S(\lambda)$ 为光源的相对光谱功率分布, $\tau(\lambda)$ 为物体或者滤色片的光谱透过率. 这两个参数可以通过实际测量得到. $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 为 CIE1931 标准观察者光谱三刺激值, 可以通过查表的方法得到. $\Delta\lambda$ 为波长间隔, x, y, z 是该颜色在 CIE1931 色度图中的色度坐标. 利用色度学颜色叠加原理, 我们可以利用单色光的三刺激值计算混合白场的色度坐标, 同时也可以计算相应的白场相关色温^[3,4].

3. 色度学特性计算

3.1. 弧光灯投影光源

夏新 DL52HWT 型投影电视的光学引擎是一款典型的单片式 digital light processing (DLP) 投影系统^[5], 使用超高压汞灯这一白光光源和带有红绿蓝三基色滤色片的色轮进行彩色显示. 使用 OCEAN-SD2000 型光谱仪测量光源的光谱相对功率分布 $S(\lambda)$, 同时使用 WFZ-25A 型紫外可见分光光度计测量色轮上红绿蓝三基色滤色片的光谱透过率 $\tau(\lambda)$, 测量结果如图 1 所示.

将图 1 所示的测量结果代入(1)和(2)式, 可得

[†] E-mail: zhaoxingzhx@yahoo.com.cn

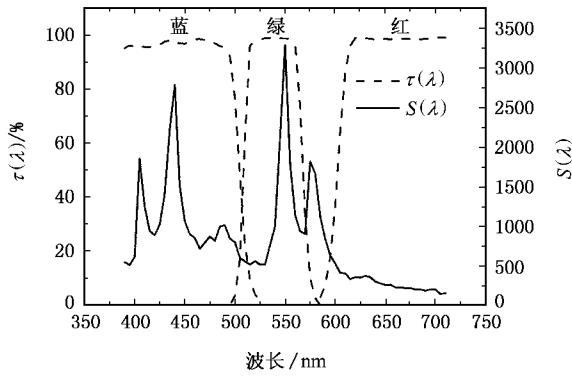


图1 夏新 DL52HWT 型投影电视光源的相对光谱功率分布 $S(\lambda)$ 和色轮滤色片光谱透过率 $\tau(\lambda)$

该系统红绿蓝三基色的色度坐标以及白场色度坐标如表 1 中所示^[6].

表 1 使用不同光源的投影系统色度学特性

	弧光灯投影光源		LED 投影光源	
	x	y	x	y
红	0.67723	0.32257	0.69744	0.30247
绿	0.2874	0.69362	0.2404	0.71406
蓝	0.14575	0.051803	0.1439	0.034609
白场	0.31317	0.32822	0.31064	0.33126
白场相关色温/K	6489		6605	
平均颜色复现误差	5.541975		9.023667	
第 13 号样品颜色复现误差	5.642717		7.698245	

表 1 中所示的颜色复现误差是用来评价系统颜色还原能力的,复现误差越大,说明系统的色彩还原能力越差.上述结果是利用孟赛尔颜色系统中的十四样品颜色计算得到的^[3].

3.2. LED 投影光源

要使用 LED 作为投影光源,必须对相应的照明系统和分色合色系统进行重新设计.为此这里的计算将针对自主设计的单片式 DLP 投影系统进行.该投影系统是针对于个人用户进行专门设计的迷你型投影机,能够实现 38—50 cm 的投影显示.其系统结构如图 2 所示^[7].

该系统使用了三个美国 Lumileds 公司生产的 Luxeon III 型红绿蓝大功率高亮度 LED,采用时序脉冲的驱动方式实现彩色显示^[8-9],系统中 X 棱镜内的两个对角面上均镀有反射膜,能够分别反射蓝光和红光,同时都能透过绿光,从而实现了三基色光路的混合.LED 的相对光谱功率分布以及 X 棱镜反射

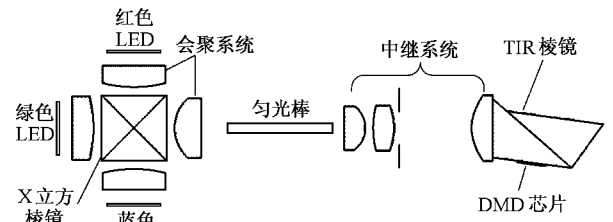


图 2 迷你型投影机的光学引擎

膜的理论设计结果如图 3 所示.

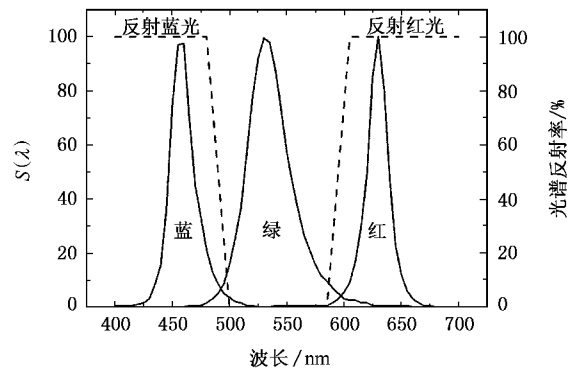


图 3 LED 相对光谱功率分布及 X 棱镜反射膜光谱反射率曲线

图中虚线为 X 棱镜反射膜光谱反射率曲线,实线为 LED 相对光谱功率分布.图中的反射率曲线虽然是理论上的设计结果,但是利用现有镀膜工艺的加工难度并不大.因此,使用该设计结果进行理论分析是完全可行的,其分析结果也将具有一定的实际意义.将上述结果代入(1)和(2)式,可以得到使用 LED 光源的投影光学系统色度学特性的计算结果如表 1 所示.

4. 分析和讨论

LED 作为一种新型固体光源,与传统光源相比具有较窄的光谱宽度,这从图 1 和图 3 中的光源相对光谱功率分布就可以看到.由于 LED 光源的光谱宽度窄,光谱能量较为集中,使得在投影系统中经过反射膜作用后其光谱能量的损失较小.而传统的白光投影光源由于具有很宽的光谱宽度以及较为分散的光谱能量,使得经过色轮滤色片作用后光谱能量的损失较大.

如图 1 所示,光源光谱 580 nm 左右的次峰所包含的光谱能量在经过滤色片后将有较大损失,光源在可见光范围内的全部光谱能量在经过滤色片后仅

剩余 84%。而图 3 所示的红蓝 LED 的光谱能量几乎全部落在了反射膜的高反射区,绿光 LED 的光谱能量几乎全部落在了两个反射膜的高透过区,因此损失的能量很小,三色 LED 的全部光谱能量经过薄膜作用后将剩余 97%。因此,使用 LED 作为投影光源将比传统光源获得更高的光谱能量利用率。

将表 1 所示的色度学特性计算结果在 CIE1931 色度图中用色三角表示,可以更好地对 LED 和传统投影光源的色度学特性进行对比,比较结果如图 4 所示。

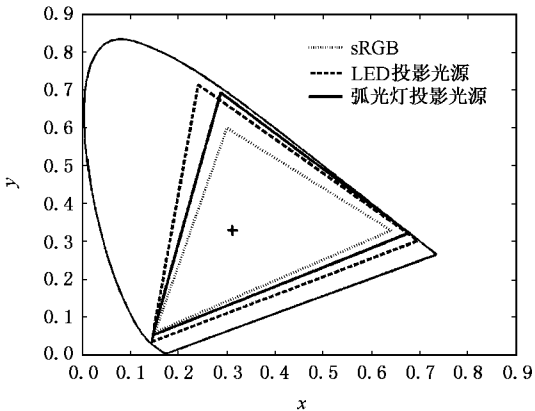


图 4 LED 与传统光源色度学特性比较

图 4 中的 sRGB 色三角是目前数字投影机使用的彩色显示规范,从图中 LED 投影光源和传统光源色三角的对比来看,二者均包含了 sRGB 色三角,且二者的白场色度坐标与 sRGB 规范也基本符合,说明使用 LED 作为投影光源是完全符合 sRGB 彩色规范的。仔细观察不难发现,LED 投影光源的色三角不仅包含了 sRGB 三角,其面积还大于传统光源的色三角,这说明使用 LED 作为投影光源能够比传统光源混合出更多的颜色,其色彩饱和度更高,色彩表现更加丰富。

从表 1 中两种光源的颜色复现误差的比较来看,LED 投影光源在色彩还原能力上略逊于传统光源。通常来讲,若第 13 号样品色即皮肤色的复现误差小于 5 个色差单位,并且平均颜色误差在 5—8 个

色差单位范围内,便达到视觉允许的较优颜色复现效果。从表 1 的计算结果看,虽然 LED 光源的颜色复现误差稍大,色彩还原能力无法达到视觉上较优的颜色复现效果,但是其误差值与一般值相差很小,色彩还原能力还是能够满足人们视觉上的基本要求的。

使用传统光源的投影系统其显示基色是通过白光透过基色滤色片得到的,系统必须在最终的色彩饱和度和亮度之间取得平衡,因此人们往往为了实现高亮度的投影显示而不得不牺牲图像的色彩饱和度。出现这一问题的原因在于传统光源的光谱宽度较大,光谱能量分布较为分散。而采用红绿蓝单色 LED 作为投影光源就能在一定程度上减小这一问题的困扰。由于 LED 的光谱宽度较小,光谱能量分布较为集中,因此光源自身的单色性较好。在保持平均功率不变的情况下采用时序脉冲驱动时,就可以在保证其光谱能量分布基本不变的情况下实现更高的发光亮度,因此使用时序脉冲驱动的单色 LED 作为投影光源将会在不牺牲色彩饱和度的前提下获得高亮度的投影显示。这是 LED 作为投影光源较传统光源在色度方面的又一个优势。

5. 结 论

通过对传统投影光源和 LED 新型投影光源两种实例的计算和分析可知,与传统的弧光灯投影光源相比,红绿蓝单色 LED 具有较窄的光谱宽度和较为集中的光谱能量分布,用于投影光源时会有较高的光谱能量利用率;同时作为一种新型投影光源,它完全符合数字投影机使用的 sRGB 彩色规范,并且比传统光源具有更丰富的色彩表现力;其颜色还原能力虽然略逊于传统光源,但是能够满足人眼的基本视觉要求;此外红绿蓝 LED 在时序脉冲驱动的工作方式下,可以在不牺牲色彩饱和度的情况下获得更高亮度的投影显示。因此,从色度学特性的要求来看,使用红绿蓝单色 LED 作为投影光源代替传统的弧光灯投影光源不仅能够满足一般投影显示的需要,同时还具有很多优势。

[1] Narukawa Y 2004 *Optics & Photonics News* 15 24
 [2] Wang W S, Jiang W, Dou X M 2005 *Acta Optica Sinica* 25 855 (in Chinese) [王蔚生、姜 维、窦晓鸣 2005 光学学报 25 855]

[3] Jing Q C, Jiao S L 1979 *Colourometry* (Beijing: Science Press) p91, 279, 291 (in Chinese) [荆其诚、焦书兰 1979 色度学(北京:科学出版社)第 91, 279, 291 页]

- [4] Song G B , Peng T J , Wan P , Li B W 2002 *Acta Physica Sinica* **51** 1575 (in Chinese) [宋功保、彭同江、万 朴、李博文 2002 物理学报 **51** 1575]
- [5] Chang C M , Shieh H P 2003 *Appl. Opt.* **39** 3202
- [6] Zhao X , Fang Z L , Song L P , Mu G G 2007 *Acta Photonica Sinica* **36** 355 (in Chinese) [赵 星、方志良、宋丽培、母国光 2007 光子学报 **36** 355]
- [7] Zhao X , Fang Z L , Mu G G *Acta Optica Sinica* (accepted) (in Chinese) [赵 星、方志良、母国光 光学学报 (已接收)]
- [8] Matthijs H. K , Gerard H , Steve P 2004 *SID 2004 International Symposium Digest of Technical Papers* 943
- [9] Philips Lumileds Lighting Company <http://www.lumileds.com>

Study on the colorimetric properties of the LED projection sources

Zhao Xing[†] Fang Zhi-Liang Mu Guo-Guang

(*Institute of Modern Optics , Nankai University , Optoelectronic Information Science and Technology Laboratory , Ministry of Education , Tianjin 300071*)

(Received 14 August 2006 ; revised manuscript received 13 September 2006)

Abstract

The colorimetric properties of the conventional arc lamp and LED are calculated and analyzed by using the colorimetry theory. Comparing to the conventional arc lamp used as projection light source , LED illuminator has higher efficiency of the spectral power and better ability of color display. It can reach sRGB standard widely used by digital projectors. The single-color LED driven by temporal pulses will produce high-brightness projection display with saturate colors. Therefore , LED can take place of conventional arc lamp to satisfy the colorimetric requirement of the projection display.

Keywords : colorimetric properties , projection light source , LED , projection display

PACC : 0760D , 4272

[†] E-mail : zhaoxingzhx@yahoo.com.cn