

激光显示光源颜色配比和色温研究

颜博霞¹, 王延伟¹, 亓岩^{1*}, 毕勇²

¹中国科学院光电研究院投影光学实验室, 北京 100093;

²中国科学院理化技术研究所应用激光研究中心, 北京 100190

摘要 为了实现对激光投影白平衡的实时控制, 根据 CIE1931 和 CIE1964 标准色度系统, 对激光红绿蓝三基色组成的激光光源进行了颜色配比和色温研究。首先, 根据格拉斯曼颜色混合定律, 介绍了三基色混合白光色坐标和色温的获得方法。接着, 理论计算了红(638 nm)、绿(532 nm, 520 nm)、蓝(445 nm)激光器在目标色温 6500 和 9300 K 下的功率配比, 分析了实现 6500~9300 K 连续可调对应的功率配比变化; 然后, 对绿光波长变化对色温和亮度的影响以及功率下降引起的色温变化进行了分析。最后, 搭建了激光光源色温测试实验系统, 相比按照标准功率配比计算的理论色温值, 实验获得的色温结果偏低约 15%。

关键词 激光光学; 色温; 白平衡; 颜色配比; 红绿蓝激光器

中图分类号 TN27; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0401004

Study of Color Proportion and Color Temperature in Laser Display

Yan Boxia¹, Wang Yanwei¹, Qi Yan¹, Bi Yong²

¹Laboratory of Projection Optics, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

²Applied Laser Research Center, Technical Institute of Physics and Chemistry,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Color proportion and color temperature in RGB laser display are studied based on CIE1931 and CIE1964 standard colorimetric observers to realize the automatic white balance of laser projection. Firstly, the color coordinates and color temperature of white color generated by RGB colors are described based on Grassmann's laws of color mixture. Secondly, the laser power ratios of red laser (638 nm), green laser (532 nm, 525 nm) and blue laser (445 nm) are calculated at 6500 K and 9300 K, and the change of power ratio is analyzed with continuously adjustable temperature of 6500-9300 K. Then, the influence of green wavelength change on color temperature and luminance, and the change of color temperature caused by power degradation are gained. Finally, an experimental system for measuring color temperature of laser display source is set up, and the experimental result of color temperature is lower about 15% than the theoretical color temperature according to the standard power ratio.

Key words laser optics; color temperature; white balance; color proportion; RGB laser

OCIS codes 140.3298; 120.2040; 330.1710; 330.1730

1 引 言

激光显示是以红绿蓝三基色激光器为光源的新型显示技术, 由于激光器单色性特点, 可真实再现客观世界丰富艳丽的色彩, 可覆盖 90% 以上颜色, 具有色域宽的显著特点^[1]。另外, 激光显示还具有亮

度高、寿命长、节能环保等优点。随着固体激光器和半导体激光器的发展, 近十年来激光显示研究成为新型显示研究的热点。限于目前绿光、红光半导体激光器功率和成本等因素, 市场上多为激光光源与 LED 混合显示产品、激光激发荧光粉等多种激光电视、激光投影产品。随着半导体激光技术的进一步

收稿日期: 2017-08-29; 收到修改稿日期: 2017-10-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0404003)

作者简介: 颜博霞(1980—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事固体激光器和激光显示方面的研究。

E-mail: yanboxia@aoe.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: qiyan@aoe.ac.cn

发展,未来纯激光光源的显示产品必然成为主流^[2]。

白平衡在投影系统中非常重要,白平衡影响着色彩还原和色调处理等一系列问题^[3]。如白光光源色彩成分发生改变,将改变屏幕上显示的物体的本身的颜色,形成色差,因此激光显示的白平衡特性直接影响用户观看效果。

传统光源的光谱成分是固定不变的,因此光源的色温无法改变。在显示设备中为达到不同的显示效果,只能修改光调制器的调制方式,但却以牺牲整机的效率为代价。另外,普通光源在使用一段时间后,由于光衰效应,其光谱成分会发生随机变化,而且光谱中不同色光发生色衰的时间周期因个体不同而均有差异。这会导致显示设备使用一段时间后出现色偏现象,虽然不影响使用,但是显示效果会大打折扣。

由红绿蓝三基色激光组成的激光白光光源,可以根据色度学计算在某色温时的红、绿、蓝三基色激光功率配比,白平衡就是调整好红、绿、蓝三基色激光的功率比例,使其混合成符合标准的白光。投影机不同的色度和色温可以构造不同颜色风格的显示图像,个人的爱好也不尽相同,因此也不可能规定统一的色坐标和色温;而且,不同地区的人对白色的感觉不一样,一般的显示都设有两种色温,暖色(6500 K)和冷色(9300 K);另外,不同环境光下用户对色温的生理和心理需求也不同。改变红绿蓝激光功率配比实现色温连续可调,可以提高显示的舒适度,实现个性化设置,全方位满足不同用户的各种需求,因此,研究激光白光光源的色温可调具有很重要的应用意义。近年来,Chellappan 等^[4]给出了不同红光波长时,6500 K 色温所需的红、绿、蓝三基色激光的功率比。Wallhead 等^[5]也报道了多组不同波长红绿蓝激光组合的功率比、亮度以及效率。另外,陈冬灵等^[6]对三基色光源连续色温调控方法进行了研究分析。闫斌等^[7]也对 LED 系统的色温和光通量可调进行了实验研究。

本文依据 CIE1931 标准色度系统,理论计算了不同色温的红绿蓝激光器功率配比。另外,在激光器的使用中,红、绿、蓝激光器都不可避免地存在着老化、温度变化等引起的功率波动,因而引起显示系统的亮度和白平衡发生改变。对功率变化、波长变化引起的亮度和色温变化也进行了分析,并通过实验得到不同功率配比下的实际色温值。

2 基本原理

根据色度学原理,当两种或以上已知亮度值和

色品坐标的颜色相加混合后,其混合色的亮度和色品坐标可以根据格拉斯曼颜色混合定律和 CIE1931 标准色度系统得到^[8-9]。

颜色的色品坐标 (x, y) 及其亮度 L 与三刺激值 (X, Y, Z) 的关系为

$$\begin{cases} X = \frac{x}{y}L \\ Y = L \\ Z = \frac{z}{y} = \frac{1-x-y}{y}L \end{cases} \quad (1)$$

已知红、绿、蓝激光器波长和亮度,红、绿、蓝三色的色品坐标分别为 (x_R, y_R) 、 (x_G, y_G) 、 (x_B, y_B) ,相应的三刺激值分别为 (X_R, Y_R, Z_R) 、 (X_G, Y_G, Z_G) 、 (X_B, Y_B, Z_B) ,则混合白光的三刺激值 (X_w, Y_w, Z_w) 应为

$$\begin{cases} X_w = X_R + X_G + X_B \\ Y_w = Y_R + Y_G + Y_B \\ Z_w = Z_R + Z_G + Z_B \end{cases} \quad (2)$$

白光的色品坐标 (x_w, y_w) 应为

$$\begin{cases} x_w = \frac{X_w}{X_w + Y_w + Z_w} \\ y_w = \frac{Y_w}{X_w + Y_w + Z_w} \end{cases} \quad (3)$$

如果已知光源色温,则可知混合白光的色品坐标 (x_w, y_w) ^[8]。设红绿蓝三色的亮度比为 $L_R:L_G:L_B$,联立(1)~(3)式可以得到红、绿、蓝三色的亮度为

$$\begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ L_w \end{pmatrix} \quad (4)$$

亮度 L 又等于光谱光视效能 K_m (683 lm·W⁻¹)、光谱刺激值 Y 和光功率 P 的乘积,即 $L=683 \times Y \times P$,因此可以得到某一色温白光下红绿蓝三基色激光器的功率配比。

3 计算结果与讨论

3.1 实现 6500~9300 K 色温连续可调

红光和蓝光激光选择常用的半导体激光器,波长分别为 638 nm^[10]和 445 nm^[11],绿色激光选择目前应用最广的 532 nm 固体激光器^[12]和 520 nm 半导体激光器^[13],各颜色的色品坐标 (x, y) 和光谱刺激值能够从 CIE1931 标准色度表中查到。

混合白光在色温 6500 K 和 9300 K 下对应的色

坐标根据 CIE1931 色品图得知,分别为(0.3128, 0.3292)和(0.2831,0.2971)。假设红、绿、蓝激光器的功率分别为 M 、 N 、 Q ,根据上节原理理论计算可得色温 6500 K 和 9300 K 时红、绿、蓝激光的功率,计算结果如表 1 所示。根据 CIE1931 标准色度系统计算,得到色温 6500 K 和 9300 K 时红、绿(532 nm)、蓝激光器的功率配比分别为 0.456:0.320:0.224 和 0.395:0.320:0.285。

表 1 CIE1931 和 CIE1964 标准色度系统下激光器的功率配比

Table 1 Laser power ratio for 6500 K and 9300 K in CIE1931 and CIE1964

CIE color space	Color temperature /K	R,G,B wavelength /nm	R,G,B power ratio
CIE 1931	6500	635, 532, 445	0.456:0.320:0.224
		635, 520, 445	0.477:0.334:0.189
	9300	635, 532, 445	0.395:0.320:0.285
		635, 520, 445	0.423:0.334:0.243
CIE 1964	6500	635, 532, 445	0.455:0.309:0.236
		635, 520, 445	0.481:0.308:0.211
	9300	635, 532, 445	0.403:0.323:0.274
		635, 520, 445	0.424:0.303:0.273

由于 CIE1931 标准色度系统适用于 $1^\circ\sim 4^\circ$ 的观察视场范围,激光投影显示应用更适合 10° 视场的 CIE1964 标准色度系统,因此,也计算了 CIE1964 标准色度系统下色温 6500 K 和 9300 K 时,红、绿(532 nm)、蓝激光器的功率配比分别是 0.455:0.309:0.236 和 0.403:0.323:0.274。

在大视场角 CIE1964 标准色度系统下,以红、绿(532 nm)、蓝光激光显示光源为例,白光色温从 6500 K 调整到 9300 K,如果亮度保持不变,则绿光

几乎不变,红光功率降低 11%,蓝光功率增加 13%;如果蓝光功率维持不变,则需要下调红、绿光功率各 21%,而总亮度会下降 13%。

综上,色温调节的方法可以分为两种,一种是亮度保持不变,保持总功率不变,降低红光功率,提高蓝光功率;另一种是保持占比最小的蓝光功率不变,在增加色温的情况下,下调红、绿光功率,这时总亮度会下降。

3.2 改变绿光波长对色温和亮度影响

随着半导体激光器输出功率从 50 mW 增加到 1 W^[13],绿光半导体激光器在激光显示中的应用越来越多。半导体激光器虽然具有可靠、温度带宽较宽等优点,但是与波长 532 nm 的固体倍频激光器相比,其输出波长在 520~525 nm 时,视见函数从 0.90 下降到 0.76,即人眼视觉感受的亮度降低了 15%。表 1 也列出了 520 nm 绿光的三基色激光光源不同色温下的功率配比。在 CIE1964 标准色度系统下,6500 K 和 9300 K 色温时红、绿(520 nm)、蓝激光器的功率配比分别是 0.481:0.308:0.211 和 0.424:0.303:0.273。以 6500 K 为例,相比 532 nm 绿光的三基色激光光源,计算结果显示,增加 6.7% 的红光功率和降低 12.5% 的蓝光功率时色温保持不变。

同时,在 CIE1964 标准色度系统下分析了波长变化对亮度的影响,表 2 和表 3 分别列出了 1 W 激光白光光源 532 nm 和 520 nm 绿光波长下对应的三基色激光光源亮度。可见,无论是 532 nm 还是 520 nm 绿光的三基色激光光源,色温在 6500 K 或 9300 K 时,亮度几乎相同。

表 2 1 W RGB(638,532,445)白光在 6500 K 和 9300 K 色温时的亮度

Table 2 Luminance of 1 W RGB (638,532,445) laser for 6500 K and 9300 K

Laser	Power /W @6500 K	Power /W @9300 K	Y /($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$)	Luminance /lm at 6500 K	Luminance /lm at 9300 K
R(638)	0.455	0.403	0.20	62.12	55.11
G(532)	0.309	0.323	0.90	189.89	198.33
B(445)	0.236	0.274	0.07	12.06	13.98
Total	1.000	1.000		264.06	267.42

表 3 1 W RGB(638,520,445)白光在 6500 K 和 9300 K 色温时的亮度

Table 3 Luminance of 1 W RGB (638,520,445) laser for 6500 K and 9300 K

Laser	Power /W @6500 K	Power /W @9300 K	Y /($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$)	Luminance /lm at 6500 K	Luminance /lm at 9300 K
R(638)	0.481	0.424	0.20	65.70	57.88
G(520)	0.308	0.303	0.76	160.09	157.59
B(445)	0.211	0.273	0.07	10.78	13.95
Total	1.000	1.000		236.57	229.42

但是,从 532 nm 固体激光器改为 520 nm 半导体激光器,色温 6500 K 下 1 W 白光对应的亮度由 264 lm 下降到 236 lm,下降约 10%;波长改变后如果保持亮度不变,6500 K 色温下绿光和红光激光器的功率分别需要增加 18% 和 11%;9300 K 色温下则需要增加 5% 的红光功率,降低 5% 的绿光功率。

表 4 某一颜色光功率下降 20% 和 40% 后的色温

Table 4 Color temperature of one color light power with 20% and 40% drop

Color temperature /K	80% $P_R:P_G:P_B$	60% $P_R:P_G:P_B$	80% $P_G:P_B$	60% $P_G:P_B$	80% P_B	60% P_B
6500	7750	9310	6093	5362	5697	5118
9300	10915	13015	9932	12252	7404	6229

在实际使用过程中红绿蓝激光光源存在着功率输出不稳定的问题,或者长期使用某一颜色的激光光源导致输出功率衰减,都会造成色温的偏移。因此,在激光投影系统中对三基色光源分别进行光功率监测,并根据监测结果找到合理的功率配比,重新调整激光光源到规定的色温范围内实现激光光源白平衡是十分必要的。在实际的激光投影系统中会放置备用的红绿蓝激光器,当光功率监测控制系统发现某一颜色功率下降时,启用备用激光器补充下降的光功率,实现白平衡。

4 实验和结果

对本课题组自行研制的激光投影用白光光源进行了色温和亮度的测试。激光显示光源三基色激光器分别是光纤耦合输出的 638 nm 半导体红光激光器、532 nm 固体倍频绿光激光器、445 nm 半导体蓝光激光器。通过集束光纤合束输出,经过积分棒等匀光器件后,激光白光照射到屏幕上,使用色彩照度计(CL-200A, Konica Minolta, 日本)测试白光色温,实验装置如图 1 所示。测试在暗场下进行,环境光照度小于 1 lx。通过调整激光驱动电流,调整激光功率配比,改变色温,根据 CIE1931 标准色度系统计算特定色温下的标准功率配比(参考表 1),图 2 所示为标准功率配比下的理论色温值和采用色彩照度计测得的实验色温值。可以看出,与理论计算的结果相比,实验色温值偏低 15%。实验值偏低的主要原因可能是实验装置中的光学积分棒的匀光效果不够好,导致红绿蓝三色光混合不均匀,没有达到理想白光的状态。虽然在实际测试中选择 ANSI 9 点测试平均值,但因为屏幕上中间色温偏低、边缘色温偏高导致测得的色温值偏低。因此,在实际的激光投影应用中,色温不仅要依靠理论的功率配比进行白平衡控制,还需要考虑投影系统中光源通过光学

3.3 功率下降对色温的影响

基于 1931 标准色度系统,采用红(638 nm)、绿(532 nm)、蓝(445 nm)激光光源,分别模拟计算了 6500 K 和 9300 K 色温下,某一颜色光功率下降 20% 和 40% 后的色温,如表 4 所示。

系统后得到的实际色温来进行白平衡控制。另外,激光投影系统的照明均匀性^[14-15]也是目前的研究热点,下一步工作将重点解决激光投影系统的照明均匀性。

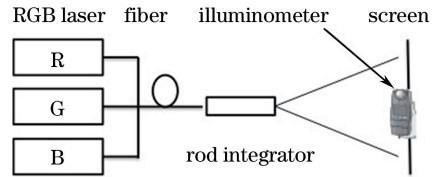


图 1 白光色温测试实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the white color temperature experiment

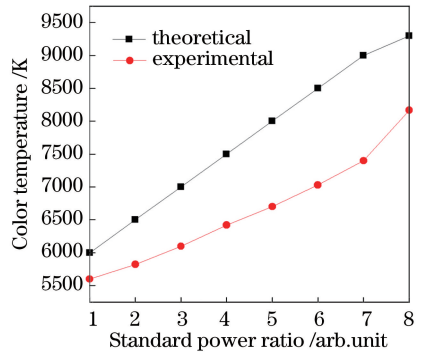


图 2 标准功率配比下理论色温值和实验色温值

Fig. 2 Theoretical and experimental results on standard power ratio

5 结 论

根据激光投影光源白平衡实时控制需求,对波长对色温和亮度的影响、功率下降对色温的影响以及不同色温对应的红绿蓝三基色功率比进行了详细分析。实验得到的色温结果相比理论值低 15%,表明在实际工作中,激光白光光源需要与光机系统结合后再进行实时白平衡控制,为下一步实现激光投影显示白平衡自动控制提供了良好的基础。

参 考 文 献

- [1] Wang Y W, Bi Y, Wang B, *et al.* Large screen laser projection display and laser television [J]. *Physics*, 2010, 39(4): 233-237.
王延伟, 毕勇, 王斌, 等. 大屏幕激光投影与激光电视 [J]. *物理*, 2010, 39(4): 233-237.
- [2] Yamamoto K. Laser display technologies and their applications [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2012, 1(6): 483-488.
- [3] Majumder A, Brown R G, Ei-Ghoroury H S. Display gamut reshaping for color emulation and balancing [C]. *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2010: 17-24.
- [4] Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based displays: a review [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(25): F79-F98.
- [5] Wallhead I, Ocaña R, Quinz P. Designing a laser scanning picoprojector. Part 1: characteristics of the optical displaying system and color-management-related issues [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(20): 4803-4909.
- [6] Chen D L, Lin Z X. Study on method of adjusting color temperature continuously based on three primary lighting sources [J]. *Computer and Modernization*, 2012, 202(6): 179-182.
陈冬灵, 林志贤. 三基色光源连续色温调控方法的研究 [J]. *计算机与现代化*, 2012, 202(6): 179-182.
- [7] Yan B, Liu T Z, Luan X Y, *et al.* The color temperature and the luminous flux of white LED systems adjustable independently [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2014, 25(6): 20-22.
闫斌, 刘廷章, 栾新源, 等. 色温和光通量独立可调的白光 LED 系统 [J]. *照明工程学报*, 2014, 25(6): 20-22.
- [8] Xu H S. *Color information engineering* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2015: 60-73.
- [9] Meyn J P. Colour mixing based on daylight [J]. *European Journal of Physics*, 2008, 29(5): 1017-1031.
- [10] Yan B X, Bi Y, Wang D D, *et al.* Compact and highly efficient 3.8 W intracavity frequency-doubled Nd:YVO₄/PPMgLN green laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(3): 0302007.
颜博霞, 毕勇, 王栋栋, 等. 紧凑高效的 Nd:YVO₄/PPMgLN 腔内倍频 3.8 W 连续绿光激光器 [J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0302007.
- [11] Mitsuyama H, Motoda T, Nishida T, *et al.* Reliability study on high power 638 nm broad stripe laser diode [J]. *Optical Review*, 2014, 21(1): 43-47.
- [12] Masui S, Miyoshi T, Yanamoto T, *et al.* Blue and green diodes for large laser display [C]. *Conference on Lasers and Electric-Optics Pacific Rim*, 2013: SA1-3.
- [13] Masui S, Miyoshi T, Yanamoto T, *et al.* 1 W AlInGaN based green laser diodes [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim*, 2013: WH3-1.
- [14] Zhang W, Liang C X, Li J, *et al.* Design of optical elements for beam shaping and uniform illumination in laser digital projection display system [J]. *Acta Optics Sinica*, 2015, 35(8): 0805001.
张巍, 梁传祥, 李金, 等. 用于激光数字投影显示系统的匀光整形元件设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0805001.
- [15] Liang C X, Zhang W, Rui D W, *et al.* Beam homogenized shaping and speckle suppression in laser projection display system using liquid crystal on silicon [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1201001.
梁传祥, 张巍, 芮大为, 等. 基于硅基液晶实现激光投影显示系统匀光整形和散斑抑制 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1201001.