

文章编号: 1001-3806(2021)04-0411-06

三基色激光显示中白平衡点的选择研究

王 聪,姚炳晖,马佳飞,方昱玮,顾 春,许立新,王 贯*

(中国科学技术大学 物理学院 光学与光学工程系,合肥 230026)

摘要: 为了探究激光显示技术中白平衡点的选择,基于颜色混合理论,采用立体色域算法研究了三基色激光显示中白平衡点改变对立体色域的影响。以 D_{65} 立体色域为标准,结合色域覆盖率,得到了激光显示系统合适的白平衡点选择范围。结果表明,当白平衡点位于黑体轨迹上时,不同的波长组合下,白点色温的最佳选择都在 6500K 左右;进一步分析白点偏离黑体轨迹的情况,可以得到不同波长组合下的激光显示系统白平衡点合适的选择范围。该研究可以为显示系统白平衡点的选择提供理论基础和依据。

关键词: 激光技术;白平衡点;颜色理论;立体色域;色域覆盖率

中图分类号: TN27;TN249

文献标志码: A

doi: 10. 7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2021. 04. 002

Selection of white balance point in three primaries laser display

WANG Cong, YAO Binghui, MA Jiafei, FANG Yuwei, GU Chun, XU Lixin, WANG Guan

(Department of Optics and Optical Engineering, School of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to explore the choice of white balance point in laser display, the influence of white balance point change on the color gamut in three primaries laser display was studied based on the color mixing theory and stereoscopic color gamut algorithm. Taking D_{65} color gamut as the standard, the appropriate white balance point selection range of laser display system was obtained by combining with color gamut coverage. The results show that when the white balance point is on the blackbody locus, the best choice of color temperature is around 6500K under different wavelength combinations. Further, considering the situation that the white point deviates from the blackbody locus, the appropriate selection range of white balance point of laser display system under different wavelength combinations can be obtained. These results can provide theoretical basis and reference for the selection of white balance point of display system.

Key words: laser technique; white balance point; color theory; stereoscopic color gamut; color gamut coverage

引 言

色域是显示效果最重要的一个衡量指标,它描述了显示系统显色的能力,色域越大,可以显示的颜色越丰富^[1]。目前,显示技术百花齐放,既有以液晶显示(liquid crystal display, LCD)、有机电致发光显示(organic light-emitting display, OLED)、量子点显示(quantum dot light emitting display, QLED)为代表的平板显

示技术,也有以三基色激光显示为代表的新型大色域显示技术。

目前大多数显示系统采用的是三基色光源,而其中以激光作为基色光源的大色域显示技术,光源光谱宽度较窄,可以给人们带来更加逼真自然的画面颜色效果。已有的对于激光显示色域的研究,主要集中在探讨波长组合、基色谱宽、基色数目对色域的影响等方面^[2-5],但是这些研究中白平衡点(简称白点)通常为固定值,即没有考虑白平衡点变化对色域的影响。

白平衡点在显示系统中可以用色温或者相关色温来描述。当白平衡点位于黑体轨迹上时,该点与某一温度下黑体辐射的颜色相同,对应的颜色温度称为色温;当白平衡点偏离黑体轨迹时,该点与某一温度下黑体辐射的颜色接近,此时对应的颜色温度称为相关色温,且该点偏离黑体轨迹的距离可以用相关色温偏移

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0401900);安徽省科技重大专项资助项目(17030901001)

作者简介:王 聪(1995-),男,硕士研究生,现主要从事激光显示颜色理论的研究。

* 通讯联系人。E-mail:wang1122@ustc.edu.cn

收稿日期:2020-08-05;收到修改稿日期:2020-09-22

量 Δuv 表示^[6], u 和 v 代表 CIE1960UCS 均匀色品图上的色品坐标。白平衡点作为显示系统的重要参量,是通过改变基色亮度配比来影响图像的显示效果。相比传统的小色域显示,以三基色激光显示为代表的大色域显示中白平衡点变化对显示色域的影响更加明显,白平衡点的选择至关重要。因此,有必要研究白平衡点变化与激光显示色域的关系,并以 D_{65} 立体色域为标准,找到最佳白平衡点。为了描述白平衡点变化对色域的影响,这里采用的是相比于平面色域更加合适的立体色域,而且,立体色域还能反映亮度对色域的影响^[7]。

本文中依据 CIE1931 标准色度系统,理论计算了不同白平衡点下激光显示系统红绿蓝三基色的亮度配比,结合显示系统立体色域的算法^[8],首次研究了三基色激光显示系统白平衡点的变化对色域体积的影响;并且以 D_{65} 立体色域为标准,针对色域覆盖率进行进一步的讨论,得到了激光显示系统合适的白平衡点选择范围。结果可以为显示系统白平衡点的选择提供理论基础和依据。

1 基本理论及算法

在三基色显示中,白平衡点的改变通常是通过改变各基色亮度配比来实现,可以根据格拉斯曼颜色混合定律以及 CIE1931 标准色度系统计算出匹配该白点所需的三基色光源的亮度配比^[9]。由 CIE1931 标准色度系统,已知红绿蓝三基色的中心波长 λ 和光谱功率分布 $E(\lambda)$,可以根据以下的公式求出红绿蓝三基色的三刺激值和色品坐标:

$$\begin{cases} X = k \int E(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = k \int E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = k \int E(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 代表光谱三刺激值, k 为归一化常数。

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z = \frac{Z}{X + Y + Z} \end{cases} \quad (2)$$

对于目标白点,其色品坐标为 (x_w, y_w) ,由格拉斯曼颜色混合定律,三基色以及混合白光的三刺激值

(X_r, Y_r, Z_r) , (X_g, Y_g, Z_g) , (X_b, Y_b, Z_b) , (X_w, Y_w, Z_w) 满足如下关系:

$$X_r + X_g + X_b = X_w \quad (3)$$

$$Y_r + Y_g + Y_b = Y_w \quad (4)$$

$$Z_r + Z_g + Z_b = Z_w \quad (5)$$

对(2)式进行变形,有:

$$\frac{Y_r}{y_r} = \frac{X_r}{x_r}, \frac{Y_g}{y_g} = \frac{X_g}{x_g}, \frac{Y_b}{y_b} = \frac{X_b}{x_b} \quad (6)$$

$$\frac{Y_r}{y_r} = \frac{Z_r}{z_r}, \frac{Y_g}{y_g} = \frac{Z_g}{z_g}, \frac{Y_b}{y_b} = \frac{Z_b}{z_b} \quad (7)$$

式中, (x_r, y_r) , (x_g, y_g) , (x_b, y_b) 分别为红绿蓝三基色的色品坐标。

将(3)式和(6)式联立,可以得到:

$$\frac{Y_r x_r}{y_r} + \frac{Y_g x_g}{y_g} + \frac{Y_b x_b}{y_b} = \frac{Y_w x_w}{y_w} \quad (8)$$

将(2)式和(8)式联立,并且利用 $x + y + z = 1$,整理可以得到^[6]:

$$\frac{Y_r}{y_r} + \frac{Y_g}{y_g} + \frac{Y_b}{y_b} = \frac{Y_w}{y_w} \quad (9)$$

式中, Y 刺激值也称为亮度值。为了保持计算不同白点时显示系统总亮度一致,令 Y_w 的值为 100。由(4)式、(8)式、(9)式 3 个方程,对于确定的三基色色坐标和白点色坐标,可以解出匹配目标白点所需的三基色亮度值 Y_r, Y_g, Y_b ;进一步通过立体色域的算法^[8],首先得到 CIEXYZ 颜色空间的色域,然后采用 CIEXYZ 到 CIELAB 色空间的转换公式,得到目标白点下三基色显示系统的立体色域,并且通过计算立体色域体积大小的算法得到色域体积。

计算不同白平衡点色域体积的算法流程图如图 1 所示。

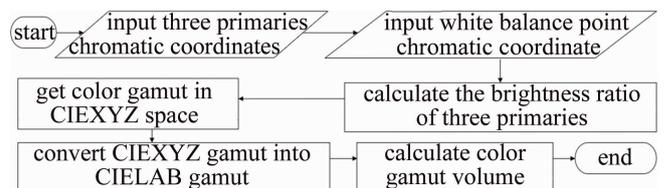


Fig. 1 Color gamut volume algorithm flow chart under different white balance points

2 计算结果与讨论

2.1 白平衡点变化与立体色域的关系

首先考虑白平衡点位于黑体轨迹上的情况,选取两组激光显示系统的三基色中心波长组合。组合 A: $\lambda_r = 638\text{nm}$, $\lambda_g = 520\text{nm}$, $\lambda_b = 445\text{nm}$ ^[9],这是激光显示

Table 1 Color gamut volume at different color temperatures under combination A and combination B

color temperature/K	color gamut volume (combination A)	ratio/%	color gamut volume (combination B)	ratio/%
4000	1.7929×10^6	100%	1.6659×10^6	100
5000	1.9658×10^6	109.64	1.7847×10^6	107.13
6500	2.1050×10^6	117.41	1.8741×10^6	112.50
9300	2.2119×10^6	123.37	1.9408×10^6	116.50
12500	2.2616×10^6	126.14	1.9670×10^6	118.07
20000	2.2987×10^6	128.21	1.9882×10^6	119.35

常用的基色波长组合。组合 B: $\lambda_r = 630\text{nm}$, $\lambda_g = 532\text{nm}$, $\lambda_b = 467\text{nm}$ ^[10], 为国际电信联盟在 2012 年发布的超高清数字视频标准 (Rec. 2020) 规定的三基色波长。光谱强度分布均为高斯型。对于激光显示, 谱宽一般很窄, 三基色谱宽均设置为 1nm。将白点色温分别设置为 4000K, 5000K, 6500K, 9300K, 12500K, 20000K。黑体轨迹上色温与白点色坐标的对应关系可以参考文献^[7]。利用提出的算法分别计算出不同白点色温下这两种波长组合的色域体积, 并且以它们各自在 4000K 下的色域体积为 100% 做比较, 结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出, 两种波长组合下, 色温升高, 色域体积均增大, 色温从 4000K 增加到 20000K, 色域体积分别增大 28.21% 和 19.35%。为了更加直观地展现色域体积随色温的变化, 做出了两种波长组合下色温和色域体积的变化关系曲线图, 如图 2 所示。由图 2 可以看出, 两种波长组合色温升高时, 色域体积表现出基本一致的增长趋势, 但增长趋势逐渐变缓, 当色温高于 20000K 时, 色域体积增长缓慢。进一步的, 计算过其它波长组合, 可以得到一致的色域变化趋势。

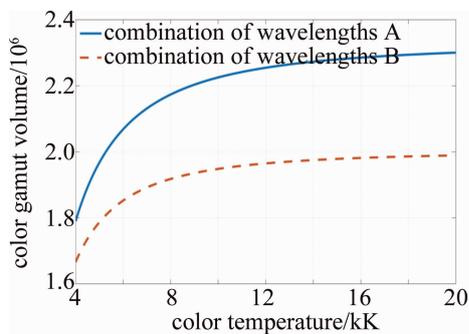


Fig. 2 Curves of color temperature and color gamut volume under two wavelength combinations

根据以上结果, 以波长组合 A 下的激光显示系统为例, 讨论此结果出现的原因。当色温从 4000K 升高到 20000K 时, 三基色亮度配比 Y_r, Y_g, Y_b 从 33.1003, 65.9433, 0.9564 变化到 22.7588, 74.2261, 3.0151。可见, 随着色温升高, 蓝基色增长比例变化最大, 对色

域的贡献增大; 红基色的比重有所降低, 对色域的贡献会降低; 而绿基色比重几乎无变化, 所以对色域的贡献

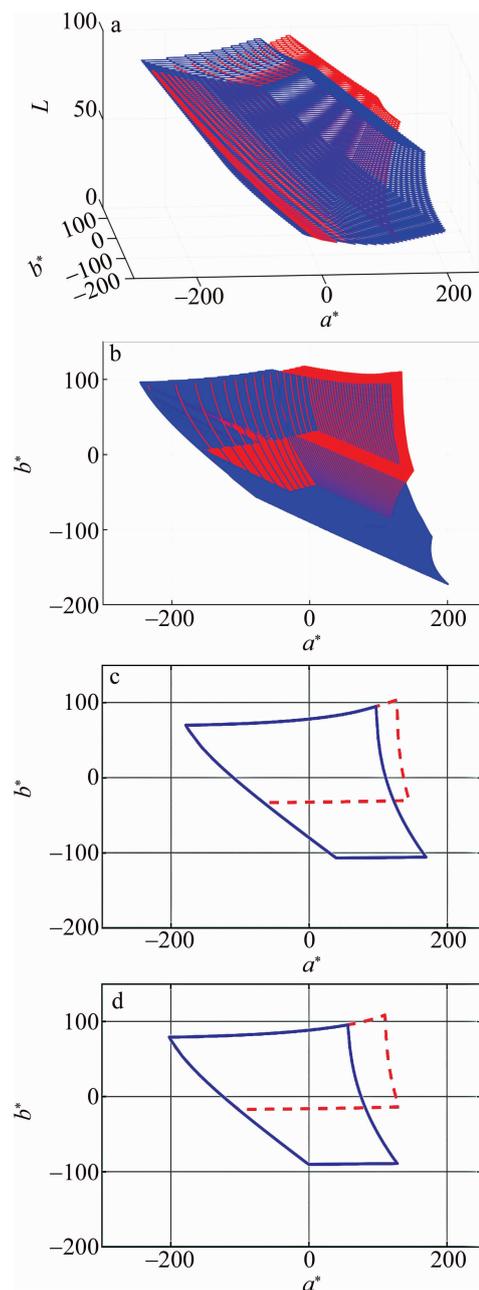


Fig. 3 Color gamut chart at 4000K and 20000K under combination A a—3-D view b—top view c— $L=50$ d— $L=60$

几乎不变。因为蓝基色对色域体积增加的贡献大于红基色对色域体积减少的贡献,所以色域体积是增加的。4000K 和 20000K 的立体色域图及其俯视图如图 3a 和图 3b 所示。为了更直观地比较,同样做出亮度 L 为 50 和 60 时的截面图,如图 3c 和图 3d 所示。其中红色虚线代表色温 4000K,蓝色实线代表色温 20000K。

在 CIELAB 颜色空间中, a^* 轴正负代表红绿, b^* 轴正负代表黄蓝^[6]。从图 3b 可以看出,对于色温 20000K 和 4000K 两种情况,前者的色立体在蓝色部分占比较大,而红黄部分占比略小,对于不同亮度下的截面也表现出同样的规律。

2.2 D_{65} 光源色域与立体色域覆盖率

从第 2.1 节可以看出,色温升高,显示系统的色域体积变大,但是色温并不是越大越好,由图 3 可以看出,色温升高,色域在蓝色区域的占比增大,红色部分的占比减小,相关研究表明,人眼对蓝色的变化并不敏感,而对肤色等偏红黄色的颜色比较敏感,色温的升高会带来红黄部分色域的缺失,显示效果变差^[11];而且某些色调上色域的增加并不会给人眼带来色彩的提升,反而会造成颜色过饱和以及图像的不自然,显示效果同样会变差。所以直接用得到的显示系统立体色域大小去评价色域是不准确的。

2.2.1 D_{65} 光源色域 为了更加合理描述显示系统的色域,WEN 在 2008 年提出使用有效显示色域来评价显示系统的色域^[12]。类似的,2018 年,浙江大学 SONG 等人也提出使用立体色域覆盖率来评价显示系

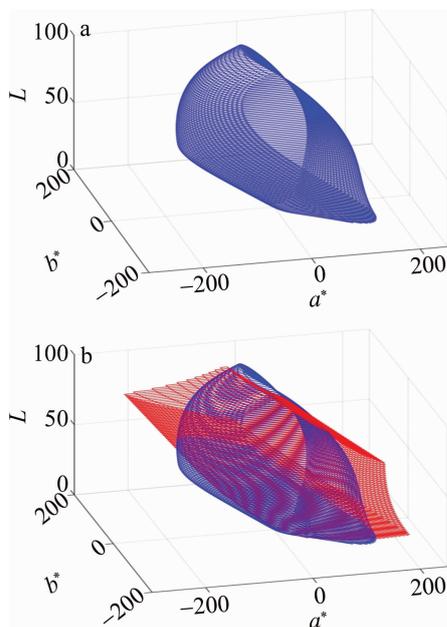


Fig. 4 a—stereoscopic color gamut of D_{65} b—stereoscopic color gamut of D_{65} and display system

统的色域^[2]。他们使用了 D_{65} 光源色域(简称 D_{65} 色域)作为标准,通过计算显示系统的色域能够覆盖 D_{65} 色域体积的多少来评估显示系统的色域。其中 D_{65} 色域如图 4a 所示,而图 4b 是将 D_{65} 色域和组合 A 下的显示系统在色温为 12500K 的立体色域放在一起时的情况。可以看到,显示系统的色域并不完全位于 D_{65} 色域里面。所以作者同样采用 D_{65} 色域作为标准,用立体色域覆盖率来进一步评价显示系统的色域。

2.2.2 立体色域覆盖率 D_{65} 色域体积可以用 V_{65} 表示,而显示系统的色域体积可以用 V 来表示,两者交集的体积比上 D_{65} 色域的体积,称为该显示系统的立体色域覆盖率,简称为色域覆盖率,用 P 表示,表达式如下:

$$P = \frac{V \cap V_{65}}{V_{65}} \times 100\% \quad (10)$$

式中, D_{65} 色域体积 V_{65} ,可以用传统麦克亚当理论计算得到,相关算法可以参考相关文献^[13-15],计算出 D_{65} 色域的体积值 $V_{65} = 2.3234 \times 10^6$ 。

2.3 白平衡点变化与色域覆盖率的关系

考虑到色域覆盖率,将不同色温下的立体色域和 D_{65} 色域放在一起,并且通过计算交集部分立体色域的算法,得到不同色温下立体色域与 D_{65} 色域交集部分的体积。

计算出不同色温下交集部分的体积,根据(10)式,可以得到两种波长组合在不同色温下的色域覆盖率,结果如图 5 所示。

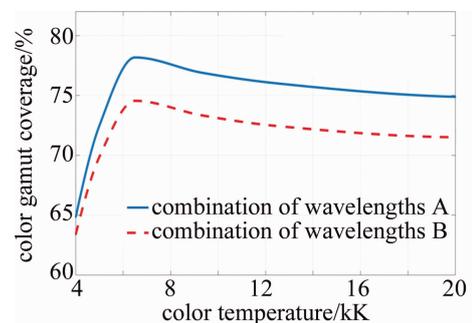


Fig. 5 Relationship curve of color temperature and color gamut coverage under two wavelength combinations

由图 5 可以看出,两种显示系统色温增加时,色域覆盖率均呈现先快速增长后缓慢下降的趋势,且在色温为 6500K 左右,存在色域覆盖率的极大值,分别为 78.17% ,74.55%。所以考虑到色域覆盖率,找到了黑体轨迹上激光显示系统最佳白点色温设置值在 6500K 左右。

综上所述,当白平衡点位于黑体轨迹上时,白点色

温设置在 6500K 左右可以获得最大的色域覆盖率,显示效果最佳。

2.4 白平衡点偏离黑体轨迹时对色域覆盖率的影响

在第 2.3 节中,为了方便讨论,只考虑白平衡点位于黑体轨迹上的情况,但是显示系统的白平衡点并不一定位于黑体轨迹上,有必要研究白点偏离黑体轨迹上时色域覆盖率的变化,从而得到更加完整的结果。

白点偏离黑体轨迹时,通常用相关色温去描述,相关色温偏离黑体轨迹的距离可以用相关色温偏移量 Δuv 表示。为了和第 2.1 节中色温的选取保持一致,选取了色温从 4000K ~ 20000K 的 6 条等温线,通过查表得到这 6 条等温线的方程^[7],将相关色温偏移量 Δuv 的取值范围设置为 $-0.04 \sim 0.04$,设置在该范围内的原因是 Δuv 的取值不能过大,一般小于 ± 0.04 ,当 Δuv 超过这个值,显示白色画面会偏离白色的感觉^[16]。利用插值的方法,可以得到在该范围内各等色温线上 Δuv 取值从 $-0.04 \sim 0.04$ 的一系列色坐标点 (u, v) ,然后将这一系列 uv 坐标转换为 xy 坐标。

以波长组合 A 的激光显示系统为例,按照第 1 节中的算法步骤,并且结合色域覆盖率,得到色温从 4000K ~ 20000K,色温和相关色温偏移量与色域覆盖率的 3 维关系图如图 6a 所示。

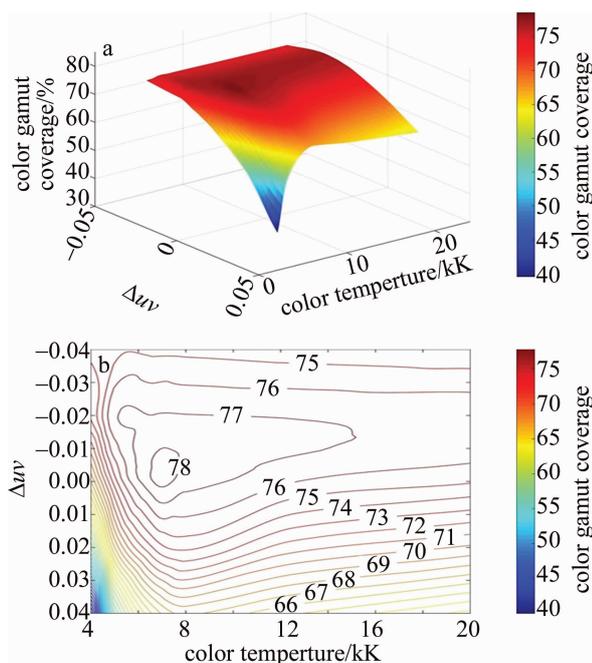


Fig. 6 Relationship between color temperature, color temperature offset and color gamut coverage

a—three dimensional figure b—contour map

由图 6a 可以看出,考虑到 Δuv ,即白平衡点偏离黑体轨迹上的情况,该显示系统存在色域覆盖率的极

大值,但是该 3 维图并不直观,为了更加直观展现色温与 Δuv 以及色域覆盖率三者的关系,做出了 $x-y$ 方向上的截面图(等高线图),如图 6b 所示。

从图 6b 可以看出,当色温为 7200K,且 $\Delta uv = -0.0025$ 左右时,该显示系统存在色域覆盖率的极大值点,程序中给出了该极大值点对应的色域覆盖率为 78.60%,对于此波长组合下的激光显示系统,当白平衡点的位置选择该点,可以带来最大的色域覆盖率,显示颜色效果最佳。

由图 6b 还可以看出,当色温设置在 6000K ~ 14000K 之间,且 Δuv 设置在 $-0.02 \sim 0.005$ 这个范围内,可以获得较大的色域覆盖率。因为不同人对白平衡点的选取存在不同的偏好^[17],所以考虑到此点,找到了一个合适的色温选择范围,即 6000K ~ 14000K,且相关色温偏移量满足 $-0.02 < \Delta uv < 0.005$,在这个范围内,人们可以根据自己的偏好设置喜欢的白点色温,不仅满足个性化的要求,而且可以获得更好的体验。

值得说明的是,针对具体应用,可以进行同样的分析过程得到不同波长组合下合适的白平衡点设置范围。

3 结 论

本文中使用的颜色理论和显示系统立体色域的算法,首先研究了三基色激光显示系统白平衡点变化对色域体积的影响,得到当白点色温升高,色域体积逐渐增大,且增长趋势变缓;进一步为了更加合理评价色域且找到白平衡点的最佳选择,使用 D_{65} 色域作为评价标准,结合色域覆盖率,得到当白平衡点位于黑体轨迹上时,白点色温的最佳选择在 6500K 左右。考虑到实际显示系统白平衡点并不一定位于黑体轨迹上,且不同人对白点选择的偏好,得到波长组合为 $\lambda_r = 638\text{nm}$, $\lambda_g = 520\text{nm}$, $\lambda_b = 445\text{nm}$ 的激光显示系统合适的白点色温选择范围为 6000K ~ 14000K,且相关色温偏移量满足 $-0.02 < \Delta uv < 0.005$ 。对于其它波长组合,可以进行同样的分析,找到合适的白点色温范围。本研究对显示系统白平衡点选择具有理论指导和实际参考价值。

参 考 文 献

- [1] XU Z Y. Large colour gamut display—the new generation of display technique[J]. Physics, 2010, 39(4): 227-231 (in Chinese).
- [2] SONG H Y, LI H F, LIU X. Studies on different primaries for a nearly-ultimate gamut in a laser display[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 23436.
- [3] MASAOKA K, NISHIDA Y, SUGAWARA M, et al. Design of pri-

- maries for a wide-gamut television colorimetry[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2010, 56(4): 452-457.
- [4] WEN S. Design of relative primary luminances for four-primary displays[J]. Displays, 2005, 26(4): 171-176.
- [5] WANG G, YANG Y H, DONG T H, *et al.* Influence of spectral linewidth and wavelength selection of laser display [J/OL]. [2020-08-03]. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11046/2524267/Influence-of-spectral-linewidth-and-wavelength-selection-of-laser-display/10.1117/12.2524267.full?SSO=1>.
- [6] HU W J, TANG Sh Q, ZHU Zh F. Modern color science and application [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007: 385-386 (in Chinese).
- [7] WANG G. Stereoscopic color gamut theory of new generation display systems[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019: 34-46 (in Chinese).
- [8] WANG G, YANG Y H, DONG T H, *et al.* Macadam's theory in RGB laser display[J]. Chinese Physics, 2019, B28(6): 064209.
- [9] YAN B X, WANG Y W, QI Y, *et al.* Study of color proportion and color temperature in laser display [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401004 (in Chinese).
- [10] SUGAWARA M, CHOI S Y, WOOD D. Ultra-high-definition television (Rec. ITU-R BT. 2020): A generational leap in the evolution of television [standards in a nutshell][J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(3):170-174.
- [11] LI Y, WANG J, LI N, *et al.* Research on color temperature and color reproduction performance based on four primary colors liquid crystal display[J]. Video Engineering, 2013, 37(2):36-39 (in Chinese).
- [12] WEN S. Representations of relative display gamut size[J]. Journal of Display Technology, 2008, 4(1):18-23.
- [13] MACADAM D L. The theory of the maximum visual efficiency of colored materials[J]. Journal of the Optical Society of America, 1935, 25(8): 249-252.
- [14] MACADAM D L. Maximum visual efficiency of colored materials [J]. Journal of the Optical Society of America, 1935, 25(11): 361-367.
- [15] FRANCISCO M, PERALES E, CHORRO E, *et al.* Computation and visualization of the MacAdam limits for any lightness, hue angle, and light source[J]. Journal of the Optical Society of America, 2007, A24(6):1501-1515.
- [16] HSIEH Y, OUYANG M, HUANG T, *et al.* Determination of optimal converting point of color temperature conversion complied with ANSI C78.377 for indoor solid-state lighting and display applications [J]. Optics Express, 2012, 20(18): 20059-20070.
- [17] KIM S, PARK D, CHOI W, *et al.* Color temperature conversion for video on TV or PC reflecting human's display preference tendency [C]//2007 International Conference on Convergence Information Technology. New York, USA: IEEE, 2007: 861-867.