

数字光处理背投电视色度学特性的研究

赵星,方志良,宋丽培,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)

摘 要:以色度学的基本理论为基础,结合数字光处理光学引擎的工作原理,探讨了单片式数字光处理光学引擎的彩色显示原理和色温调节原理.提出了单片式数字光处理光学引擎色度学特性的理论计算公式,并利用该公式对夏新 DL52HWT 型投影电视光学引擎的显示三原色色度坐标、白场平衡的色度坐标和相关色温以及颜色复现误差等色度学特性进行了计算和分析,并对理论计算公式进行了验证.

关键词:投影显示;色度学特性分析;色度学;色轮;DLP

中图分类号:TN949.191;TN942.1 文献标识码:A 文章编号:1004-4213(2007)02-0355-4

0 引言

随着大屏幕显示技术的日趋成熟,投影电视越来越多地走进人们的家庭.从采用的显示技术来看主要有 LCD、LCoS(Liquid Crystal on Silicon)和数字光处理(Digital Light Processing,DLP)三种^[1].其中 DLP 背投电视具有高亮度、高对比度、纯数字化和长寿命等特点,它通常采用单片 DMD(Digital Micro-mirror Device)作为光调制器,其核心组件——光学引擎由 UHP 光源、色轮、积分方棒、DMD 芯片和投影物镜组成.现阶段我国自身研制开发能力相对较弱,研究的重点大多放在光学系统的结构设计上.然而投影电视的光学引擎,一方面不仅要求能够获得高亮度清晰的图像显示,还要求具有较好的色彩表现能力^[2],另一方面还要研究以新型光源来改善照明的效果及减小热影响.而这些应该是通过对光学引擎的研究来实现的.从调研的情况来看,关于色轮系统的研究报道很少,相关的一些资料也基本是对色轮工作原理的介绍,并没有从理论上进行详细的科学计算和分析.为此,本文根据 DLP 光学引擎的工作原理,结合色度学的基本理论,深入探讨了单片式 DLP 光学引擎的彩色显示原理和色温调节原理,并提出了其色度学特性的理论计算公式.通过对实际光学引擎色度学特性的相关计算和分析,验证了所提出的色度学特性计算公式的正确性.对照明光源的效率和其热影响问题将另文讨论.

1 色轮

DLP 投影系统光学引擎根据其分色合色方式不同通常分为三片式和单片式两种.三片式结构使用三片 DMD 和分色合色棱镜实现彩色显示,而单

片式结构使用一片 DMD 和色轮进行彩色显示.

色轮由带有显示基色滤色片的圆盘和带动圆盘高速转动的马达组成,此外,还包括相关的马达和信号控制电路.为了获得正确的彩色图像显示,色轮高速旋转时,系统控制其马达转速与电视信号同步^[3],此时,UHP 光源发出的白光经过色轮上的基色滤色片变为所需的基色,经过与电视信号同步的 DMD 的快速调制后被依次投射到屏幕上,人眼利用视觉暂留功能就看到了彩色的图像显示.

根据色轮上基色滤色片及其排列方式不同,色轮的发展大致经历了三个阶段,目前在家用背投电视中常用的是六段式色轮,这种色轮是将 R、G、B 基色滤色片按照 RGBRGB 的方式进行如图 1 的排列,能够较好的显示色彩鲜艳的动态图像.本文将对这种常见的色轮进行深入讨论.

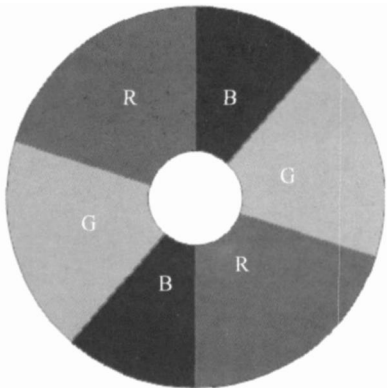


图 1 色轮滤色片
Fig.1 Schematic diagram of the color filter

2 色度学基本理论

根据色度学的理论^[4-5],可以利用式(1)和(2)计算某种颜色的三刺激值和色度坐标

$$\begin{cases} X = \sum S(\lambda) \tau(\lambda) \overline{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = \sum S(\lambda) \tau(\lambda) \overline{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = \sum S(\lambda) \tau(\lambda) \overline{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{cases}$$

(1)

$$\begin{aligned}x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z &= \frac{Z}{X + Y + Z} \\ x + y + z &= 1\end{aligned}$$

(2)

式中, 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, 这两个参量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, 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^[6-7].

3 单片式 DLP 光学引擎色度学特性的计算公式

由于在整个光学引擎中, 对显示原色的色度起决定作用的是光源和色轮滤色片, 即光源的相对光谱功率分布 $S(\lambda)$ 和色轮滤色片光谱透过率 $\tau(\lambda)$, 将这两个参量代入式 (1) 就可以计算出用于彩色显示的红绿蓝原色的三刺激值 (X_R, Y_R, Z_R)、(X_G, Y_G, Z_G)、(X_B, Y_B, Z_B).

若色轮的转速为每秒 w 转, 以红色滤色片为例, 设其在色轮上的开口角度为 a , 当色轮转动一周时, 可以得到由滤色片开口角度和色轮转速这些物理因素所决定的红原色最长显示时间为 $T_{Rmax} = \frac{a}{360w}$, 设系统所显示的对应于某一色温值的白场平衡已经确定, 并且由该白场的红绿蓝三原色比例确定出 DMD 对红原色的打开时间为 T_{R0} , 同时, 设系统根据此白场条件下某种颜色的红绿蓝组成比例确定的 DMD 对红原色的打开时间为 T_R , 于是可以得到关于系统在某种白场条件下进行彩色显示时, DMD 对红原色的两个调制时间比例: $K_R = T_{R0} / T_{Rmax}$ 和 $C_R = T_R / T_{R0}$, 由系统彩色显示的原理分析可知, K_R 、 C_R 的值均小于等于 1. 因此, 在色轮转动一周的时间内, 红原色对人眼的刺激作用以三刺激值可以表示为

$$\begin{cases} X'_R = X_R T_{Rmax} K_R C_R \\ Y'_R = Y_R T_{Rmax} K_R C_R \\ Z'_R = Z_R T_{Rmax} K_R C_R \end{cases}$$

将同样的分析过程应用于绿原色和蓝原色, 再结合颜色叠加原理, 就可以得到在色轮转动一周的单位时间内, 光学引擎所显示的混合颜色的三刺激值, 如式 (3) 和 (4).

$$\begin{aligned}X &= X_R \frac{a}{360w} K_R C_R + X_G \frac{b}{360w} K_G C_G + \\ &\quad X_B \frac{c}{360w} K_B C_B \\ Y &= Y_R \frac{a}{360w} K_R C_R + Y_G \frac{b}{360w} K_G C_G + \\ &\quad Y_B \frac{c}{360w} K_B C_B \\ Z &= Z_R \frac{a}{360w} K_R C_R + Z_G \frac{b}{360w} K_G C_G + \\ &\quad Z_B \frac{c}{360w} K_B C_B \\ K_i &= T_{i0} / T_{imax}, (i = R, G, B) \\ C_i &= T_i / T_{i0}, (i = R, G, B)\end{aligned}$$

(3)

(4)

式中, 色轮上红绿蓝三基色滤色片的开口角度分别为 a 、 b 、 c , X 、 Y 、 Z 是混合颜色的三刺激值, 其余变量的定义同上. 利用式 (3) 和 (4), 可以计算出各种混合颜色的三刺激值, 进而可以对单片式 DLP 背投电视光学引擎的色度学特性进行深入分析. 同时也可以通过对多组数据进行亮度的定性分析, 这方面将另文进行专门讨论.

4 投影电视光学引擎的色度学特性计算实例

4.1 基本参量的测量

夏新 DL52HWT 型投影电视的光学引擎是典型的单片式 DLP 结构, 使用德国欧司朗 (OSRAM) 120W UHP 弧光灯作为光源, 色轮为图 1 的六段式色轮, 该电视可以实现 12 000 K、9 300 K、6 500 K 等不同的色温调节^[8].

使用 OCEAN-SD2000 型光谱仪测量夏新 DL 52 HWT 型投影电视光源的光谱相对功率分布 $S(\lambda)$, 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, 测量结果如图 2. 同时, 经过测量得到色轮上红绿蓝三基色

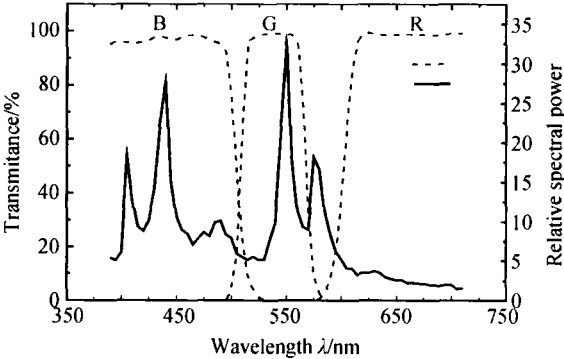


图 2 夏新 DL52HWT 型投影电视光源的相对光谱功率分布 $S(\lambda)$ 和色轮滤色片光谱透过率 $\tau(\lambda)$
Fig. 2 Relative spectral power distribution $S(\lambda)$ of the source and the spectral transmittance $\tau(\lambda)$ of the color wheel of the Amoisonic RPTV Model DL52HWT

滤色片的开口角度分别为 75°、55° 和 50°。

4.2 光学引擎的色度学特性计算和分析

将上述测量结果代入式(1)和(2)中,取波长间隔 Δλ 为 5 nm,可以计算得到系统用于显示的红绿蓝三原色的色度坐标如表 1。

表 1 夏新 DL52HWT 型投影电视光学引擎显示原色色度坐标的计算结果

	Tristimulus values			CIE1931XYZ chromaticity coordinates	
	X	Y	Z	x	y
Red	2 798.3	1 332.9	0.815 51	0.67 723	0.322 57
Green	5 251.3	12 674	346.85	0.287 4	0.693 62
Blue	4 565.4	1 622.7	25 135	0.145 75	0.051 803

为了更直观地表示系统的色度学特性,将计算得到的红绿蓝三原色的色度坐标在 CIE1931 色度图中连接成为色三角,与 PAL 制式和 NTSC 制式^[4]的色三角进行比较,如图 3,其中 R*、G*、B* 表示红绿蓝三种原色。从图 3 可以看到,该系统的色三角包含了 PAL 制式电视信号的色三角,因此从显示色域的角度来看是符合 PAL 制式颜色显示规范的。

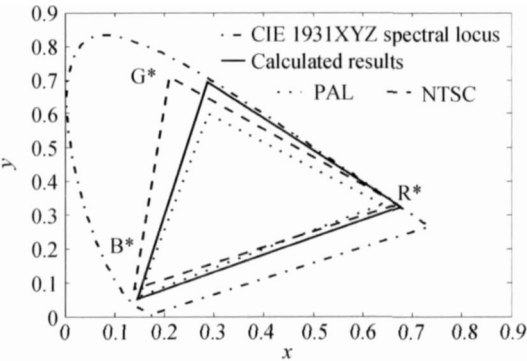


图 3 夏新 DL52HWT 型投影电视光学引擎的显示色域
Fig. 3 Color gamut of the optical engine of the Amoisonic RPTV Model DL52HW

表 2 夏新 DL52HWT 型投影电视光学引擎的颜色复现误差

Munsell Label	7.5R 6/4	5Y 6/4	5GY 6/8	2.5G 6/6	10BG 6/4	5PB 6/8	2.5P 6/8
ΔC	4.745 472	4.486 462	7.199 712	5.084 036	3.537 267	4.968 171	4.968 863
Munsell Label	10P 6/8	5Y 8/10	4.5G 5/8	3PB 3/11	5YR 8/4	5GY 4/4	Average
ΔC	6.147 758	10.511 82	6.824 895	4.207 955	5.642 717	3.720 541	5.541 975

经过计算得到平均颜色复现误差为 5.541 975,代表人体肤色的样品色 5 YR 8/4 的复现误差为 5.642 717。通常来讲,若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。因此,从计算结果来看,该系统光学引擎的颜色复现误差在允许范围之内,其色彩还原能力较优。

5 结论

本文结合 DL P 光学引擎的工作原理,深入探讨

为了计算系统白场平衡的色度坐标和色温值,取式(3)中的比例因子 $C_i = 1$,得到简化的计算式

$$\begin{cases} X = X_R a K_R + X_G b K_G + X_B c K_B \\ Y = Y_R a K_R + Y_G b K_G + Y_B c K_B \\ Z = Z_R a K_R + Z_G b K_G + Z_B c K_B \end{cases} \quad (5)$$

式中,公式中各个变量的物理含义与式(3)和(4)相同。此时,将前面计算所得的红绿蓝三原色的三刺激值以及测量得到的各基色滤色片的开口角度代入式(5),计算 DMD 对每种原色始终保持“打开”状态时的白场色度坐标和色温。计算结果显示,该状态下白场在 CIE1931 色度图中的色度坐标为(0.252 329, 0.304 805),相关色温值为 12 201 K。

从图 2 的光源相对光谱功率来看,蓝绿光谱能量较强,光源的整体色温偏高,因此在色轮基色滤色片开口角度固定的情况下,要想获得较低色温的白场平衡,必须减小蓝、绿原色的显示时间。然而色轮的物理结构是固定的,所以只能通过电子控制的方法减小 DMD 对蓝、绿原色的“打开”时间,达到降低色温的目的。因此在 DMD 始终保持打开状态下计算系统所获得的白场平衡,应该是该系统物理结构所能决定的色温值最高的白场平衡。考虑到光源和色轮参量的测量误差以及相关色温求解算法的误差,认为该计算结果与实际背投电视可供调节的 12 000 K 的最高色温值基本一致。这一结果同时也验证了所提出的单片式 DL P 光学引擎的色度学特性计算公式是正确的。

对于彩色图像显示的电视来说,颜色复现误差是一个重要的指标,它是用来评价系统色彩还原能力的重要依据,颜色复现误差越大,则说明系统还原彩色图像颜色的能力越差,为此使用孟赛尔颜色系统中的颜色样品计算其颜色复现误差 ΔC^[4],见表 2。

了其彩色显示原理和色温调节原理,并在此基础上结合色度学的相关基本理论,提出了单片式 DL P 光学引擎色度学特性的理论计算公式。并且利用该公式配合色度学的一些基本计算方法对夏新 DL52HWT 型投影电视光学引擎的显示三原色色度坐标、白场平衡的色度坐标和相关色温以及颜色复现误差等色度学特性进行了计算。其中以三原色色度坐标计算为基础,进一步计算了该光学引擎输出的白场平衡相关色温,得到其计算结果为 12 201 K,经过分析,证明它正是系统所能提供的最高色温值,

并与该投影电视生产厂商所提供的最高色温 12 000 K 基本符合,验证了所提出的色度学理论计算公式的正确性.

参考文献

- [1] WANG Tian-ji, YANG Shi-ning, LI Yao-tang. Progress in the latest display technology [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2004, 17(4): 1-7.
王天及, 杨世宁, 李耀棠. 现代显示技术的进展[J]. *光电子技术与信息*, 2004, 17(4): 1-7.
- [2] ZHENG Z R. Color-separating multilayer systems used for TFT-LCD projectors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(8): 1016-1019.
- [3] MARSHALL S W. Phase error control for color wheel [P]. U. S. Patent, H04N, 5691780. 1997: 11-25.
- [4] JING Qi-cheng, JIAO Shi-lan. Colourometry [M]. Beijing: Science Press, 1979: 91-98; 279-282; 291-292.
荆其诚, 焦书兰. 色度学 [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 91-98; 279-282; 291-292.
- [5] GAO Zhu-qing, FAN Zheng-xiu, LI Ru-feng. Chroma analysis of optical films [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(3): 838-842.
高竹青, 范正修, 李如凤. 光学薄膜的色度分析[J]. *光子学报*, 2000, 29(9): 838-842.
- [6] DAI Cai-hong, YU Jia-lin. Discussion on the calculating methods for color temperature of the source [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2000, 21(3): 183-188.
代彩红, 于家琳. 光源相关色温计算方法的讨论[J]. *计量学报*, 2000, 21(3): 183-188.
- [7] XING Ting, ZHAO Tian-dong. An improved algorithm to calculate correlated color temperature [J]. *Journal of Zhejiang University (Natural Science)*, 1997, 31(5): 682-686.
邢廷, 赵田冬. 相关色温计算的一种改进算法[J]. *浙江大学学报*, 1997, 31(5): 682-686.
- [8] Manual of the AMOI DLP-RPTV [Z].
夏新光显背投电视使用手册 [Z].

Study on Colorimetric Characters of Digital Light Processing Rear Projection Television

ZHAO Xing, FANG Zhi-liang, SONG Li-pei, MU Guo-guang

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Optoelectronic Information Science and Technology Laboratory, MOE, Tianjin 300071, China)

Received date: 2005 - 11 - 28

Abstract: The principles of the color display and the color temperature adjusting for the single-panel DLP optical engine were discussed, combined with the fundamental theory of the colourometry and the character of the DLP optical engine. The formula to calculate the colorimetric characters for the single-panel DLP optical engine was given. By using the formula on the optical engine of the AMOITM DL52HWT rear-projection TV the chromaticity coordinates of the primary colors, the white balance, the color temperature of the white balance and the color recurrent errors were calculated. Finally, the formula was proved with the analysis of the calculation results.

Key words: Projection display; Analysis of the colorimetric characters; Colourometry; Color wheel; DLP



ZHAO Xing: was born in Nov. 1980. He is a Ph. D. candidate in Institute of Modern Optics, Nankai University. His research fields include optical display and projection display.