

宽色域视频图像技术研究进展

刘琦*, 杨静, 李文元

天津大学微电子学院, 天津 300072

摘要 宽色域技术是目前画质增强方向的研究热点之一,该技术可以大大提高视频图像的色彩还原能力,改善人眼的视觉感受。扩展色域的方法主要分为3个方向,传输“负”值色光、高饱和三原色以及多原色。首先简述了宽色域技术的研究意义,然后主要对现有标准色域和主流宽色域标准进行了介绍,并且详细阐述了多原色宽色域的成像与显示技术,最后讨论了该领域待解决的问题以及未来发展趋势。

关键词 宽色域; 多原色; 颜色空间; 成像与显示

中图分类号 TN949.197 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231063

Research Progress of Wide Color Gamut Video Image Technology

Liu Qi*, Yang Jing, Li Wenyuan

School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Wide color gamut technology is one of the hot topics in the direction of image quality enhancement, which can considerably improve the color reproduction ability of video images and improve the visual perception of the human's eyes. The method of expanding the color gamut is divided into three main directions, the transmission of “negative” color light, high-saturation three-primary colors, and multi-primary colors. First, the research significance of wide color gamut technology is briefly described, then the existing standard color gamut and normal wide color gamut standards are introduced, and the imaging and display technology of multi-primary-color wide color gamut is elaborated. Finally, the problems to be solved in this field and the future development trend are discussed.

Key words wide color gamut; multi-primary colors; color space; imaging and display

1 引言

随着信息技术的高速发展,图像与视频已经成为人类获取和交换信息的常见载体。除清晰度外,色彩是衡量其质量优劣的重要参数。成像与显示设备的色彩表现力可以用色域来表示^[1],其为设备可以展现的最大颜色范围。目前应用最广泛的色彩空间是国际电信联盟(ITU)发布的 Rec. ITU-R BT. 709 标准(BT. 709)^[2],高清晰度电视(HDTV)广播系统执行的就是 BT. 709 标准。然而此标准的红绿蓝(RGB)三原色构成的色彩空间只能覆盖人眼可见色域的 33.25%^[3],不能准确再现人眼可见的所有色彩。为了解决这一问题,宽色域(WCG)技术应运而生。宽色域技术可以扩展色彩空间,提高色彩还原能力,满足人们对于高品质视频图像的需求。

在显示设备中广泛应用红色(R)、绿色(G)、蓝色

(B)三原色混色呈现出所需的颜色^[4],因此 BT. 709 色域为三角形区域,其色域覆盖范围与标准色域 sRGB 色域相同。Rec. ITU-R BT. 2020(BT. 2020)^[5]标准定义的超高清电视(UHDTV)色域范围同理也为三角形区域。图 1 中,色度图中的舌形曲线表示人眼可见色域范围。网球的颜色非常饱和,介于绿色和黄色之间,其正好位于 HDTV 色域的边缘但不在其所能覆盖的色域范围内^[6],这意味着网球的颜色不能在 HDTV 上准确再现。

下面这个案例能够更加直观地展现宽色域带来的影响。图 2 展示了 HDTV 和 UHDTV 的色彩表现差异。其中,UHDTV 能够准确再现该花卉图中的所有色彩,然而若采用 HDTV 设备观看该图,只有绘制出的部分能够正确显示图像色彩,在该图中正确显示的像素点占比为 37.5%^[7],其余灰色部分出现失真。

除数字影视领域外,宽色域技术还可以为各类应

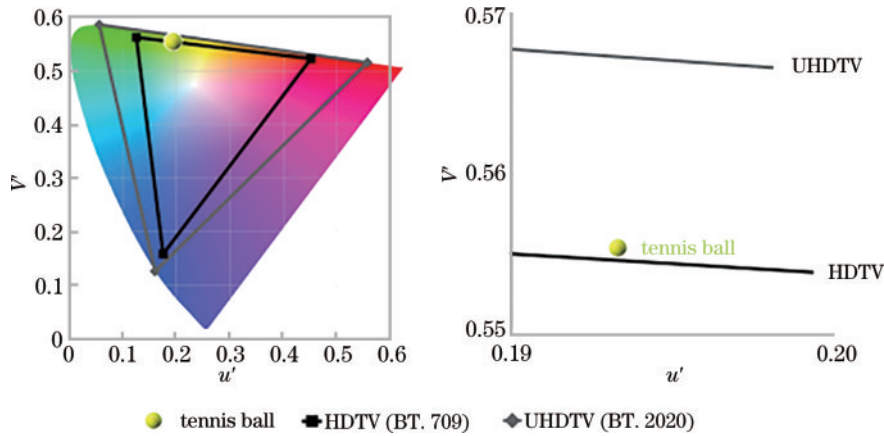


图 1 网球对应颜色色度图及其局部放大

Fig. 1 Color chromaticity diagram of a tennis ball and its partial enlargement

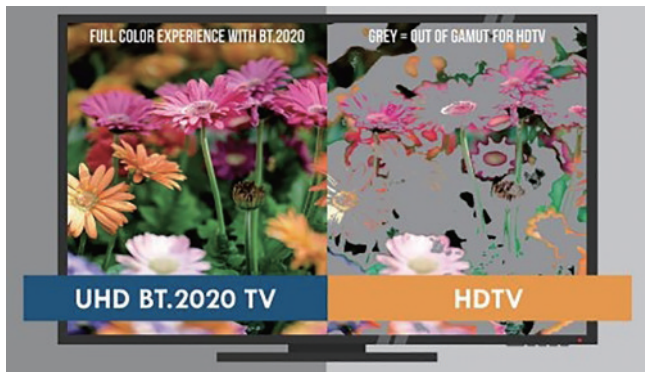


图 2 相同图像在 HDTV 和 UHD TV 的显示对比图

Fig. 2 Comparison of the same image displayed on HDTV and UHD TV

用场景提供更加精准的色彩表现,如电子商务、高保真彩色印刷、文物复刻等。例如,在电子商务方面,采用

宽色域技术可以减少服装等商品因色差问题导致的退货现象。同时,宽色域技术为远程医疗等需要高保真彩色图像的行业带来更多的可能性,使得医生在诊断时能够更加准确地判断病情,提高医疗服务的质量和效率。

显示设备在技术上向着高亮度、高动态范围(HDR)^[8]、高分辨率、高刷新率、宽色域等方向迅速发展^[9-10]。根据 IHS Market 公司的调查结果,2015—2022 年宽色域显示设备普及率逐年上升,预测 2023 年将达到 21.2%,如图 3 所示^[11]。因此,宽色域技术仍有很大的研究空间与发展前景。本文首先详细介绍扩展色域的相关技术,包括各种常用色域标准;然后介绍基于多原色成像与显示的宽色域技术研究进展及其应用;最后分析其发展趋势,为今后宽色域视频图像技术的研究提供参考。

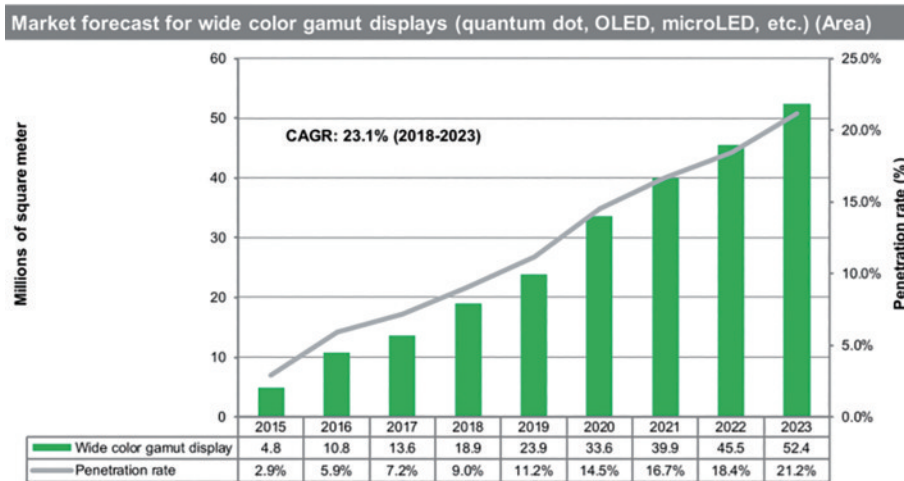


图 3 2015—2023 年宽色域显示设备普及率预测

Fig. 3 Prediction of the popularity of wide color gamut display devices from 2015 to 2023

2 扩展色域的相关技术

宽色域技术的研究工作主要分为 3 个方向:传输“负”值色光方法、高饱和度三原色和多原色方法,其

中,多原色的成像与显示技术也值得关注。

2.1 传输“负”值色光信号

根据三原色理论可知,自然界中的大多数颜色都可以通过红绿蓝三原色混合形成。1931 年,CIE 规定

了 R、G、B 三原色标准波长分别为 700 nm、546.1 nm、435.8 nm。图 4 展示了 CIE 1931 RGB 混色实验结果,红、绿、蓝三色光谱均存在负值。例如,在 435.8~546.1 nm 这一段红光刺激值出现负值。此时,必须把一个或两个原色光移到待匹配色光一侧,才能使两侧产生同一色感。若规定向右侧加入的色光量为正值,那么左侧就相应为负值。因此根据 CIE 1931 RGB 混色实验结果可知,当使用 RGB 三原色来表示某些高饱和度的色光时,无论将 RGB 按何种比例混色,均无法用 RGB 三原色相加配出,也就是说需要实际中不存在的“负”值色光才能产生某些高饱和度的待匹配色光。

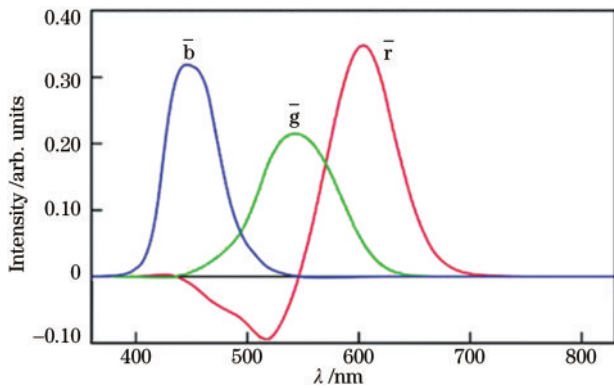


图 4 CIE 1931 RGB 混色曲线

Fig. 4 CIE 1931 RGB color mixing curves

为了扩展色域范围,国际标准化组织先后制定了一些标准来兼容“负”值信号^[3]。1998年,ITU发布的第一个宽色域国际视频标准为 ITU-R BT. 1361 (BT. 1361)^[12],其将 Pointer 色域^[13]作为宽色域系统的目标色域,使色域覆盖率提高为 39.40%^[14]。Pointer 色域是包含了人眼可见的所有真实表面颜色的集合,它涵盖了自然界中所有真实反射的颜色(非自发光)。因此,许多宽色域标准都将其作为目标色域。BT. 1361 采用非对称的伽马校正曲线,以压缩信号中的“负”值部分。但是 BT. 1361 并未得到实际应用,2015年国际标准化组织取消了 BT. 1361。取而代之,真正推动宽色域研究进程的国际标准为 2006年国际电工委员会(IEC)制定的 IEC61966-2-4,也就是 Sony 公司提出的 xvYCC 色彩空间。目前的彩色摄像机实际上已经可以采用线性矩阵计算“负”值的 RGB 信号。但是该方法有很大局限性:1)为了避免增加量化阶数,增大数据量导致频率带宽占用过高的问题,该方法对“负”值彩色信号的压缩较大。这不仅会影响信号的保真度,而且会导致接收端恢复困难,影响数据的准确性,使颜色重现时产生误差。特别是对于“负”值红色,因为它的绝对幅值远大于“负”值绿色和“负”值蓝色的绝对幅值。2)xvYCC 色彩空间包含了很多物理无法

实现的颜色,为了充分利用该色彩空间,还需要定义新的最佳发光色彩空间^[15]。3)带来的色域扩展效果非常有限,相对于目前广泛应用的 BT. 709/sRGB, xvYCC 的色域范围实际上只增加了 5% 左右^[16]。

2.2 高饱和度三原色

Adobe RGB、DCI-P3 和 ProPhoto RGB 等宽色域标准都通过增加原色的饱和度的方法来扩大色域范围。ITU 提出的面向 UHDTV、4K 和 8K 超高清视频系统的 BT. 2020 标准通过选用谱色光作为 RGB 三原色,将色域覆盖范围扩大到可视色域的 63.3%。本小节按照出现的时间顺序依次介绍对于标准色域 sRGB 而言,选用高饱和度三原色的色域标准及其应用。

2.2.1 Adobe RGB 色域

Adobe RGB 是由 Adobe 公司于 1998 年开发的,开发目的是尽可能在青色(C)、洋红色(M)、黄色(Y)和黑色(K)的 CMYK 彩色印刷中利用显示器等设备的 RGB 颜色模式囊括更多的颜色。Adobe RGB 使用的红色原色和蓝色原色与 sRGB 相同,但采用的绿色原色更加饱和,因此在青绿色色系显示效果上有所提升,色度坐标总结如表 2 所示。Adobe RGB 主要解决了印刷与显示设备颜色不同的问题,通常用于印刷、摄影和图形设计等领域。目前,很多专业商用大屏以及专业摄影的显示设备将 Adobe RGB 色彩空间作为目标色域,已经可以覆盖大于 99% 的 Adobe RGB 色域。

2.2.2 ProPhoto RGB 色域

ProPhoto RGB 也被称为 reference output medium metric RGB (ROMM RGB),是由柯达(Kodak)公司开发的一种输出参考 RGB 色彩空间。1999年,Kodak 公司发布了 ROMM RGB 色彩空间的白皮书并于 2000 年在 PICS 会议中发表^[17]。ProPhoto RGB 色域面积非常大,包含了 Pointer 色域所记录的所有可能出现的色彩,甚至超过了人眼可视的色域范围。摄影常用的 RAW 格式图像通常会出现 sRGB 和 Adobe RGB 色彩空间之外的颜色,尤其是在高饱和度区域,因此专业摄影人员经常应用 ProPhoto RGB 色域。此外,ProPhoto RGB 也可在对 RGB 图像的通道进行非线性变换(色调修改、色彩平衡调整等)时使用。然而 ProPhoto RGB 色域中大约 13% 的色彩空间中呈现的颜色是虚构的颜色,采用的绿色原色和蓝色原色也是虚构的,不存在且不可见。此外,在具有如此大的色域的色彩空间中工作时,更适合使用 16 位色彩深度而非 8 位,以避免色调分离效应。ProPhoto RGB 还具有色间相关性和感知非线性的缺点,因此其不适合应用于色度压缩方面。

2.2.3 DCI-P3 色域

DCI-P3 是美国电影行业推出的一种宽色域标准,是目前数字电影回放设备的色彩标准之一。其于 2007 年由数字电影倡议组织(DCI)定义,由电影和电视工程师协会(SMPTE)在 SMPTE EG 432-1^[18]和 SMPTE RP 431-2^[19]中发布。DCI-P3 使用与 sRGB 和 Adobe RGB 相同的蓝色原色与更加饱和的红色原色和绿色原色,色度坐标参见表 2。在 CIE 1931 xy 色度图中,DCI-P3 色彩空间覆盖了 45.5% 的人眼可视色域和 86.9% 的标准色域 sRGB,在 CIE 1976 $u'v'$ 色度图中对应的覆盖率分别是 41.7% 和 85.5%。相对于 Adobe RGB 来说,DCI-P3 色彩空间的色域覆盖面积提升并不多,但是它可以更好地提升人眼观感。也就是说,DCI-P3 是一个更加注重于视觉冲击,而不是色彩全面性的色域。相对其他色彩标准,它拥有更广阔的红色和绿色系色彩范围。

2015 年 10 月,苹果的 iMac 台式机成为第一台内置宽色域显示器的消费产品型电脑,支持 DCI-P3 色彩空间^[20],之后所有的苹果产品都是支持 DCI-P3 色域的。目前,DCI-P3 已成为家用大屏显示设备的常用色域标准,例如 LG 45GR95QE-B 显示器色域覆盖范围达到了 DCI-P3 色彩空间的 98.5%。2022 年国际信息显示学会(SID)显示周上,京东方(BOE)展示了一款 95 英寸 8K OLED 面板,色域范围能够覆盖 99% 的 DCI-P3^[21]。

2.2.4 BT. 2020 色域

BT. 2020 是 2012 年由 ITU 颁布的定义标准动态范围(SDR)和宽色域的 UHD TV 的标准,包括了图像分辨率、位深度、原色和颜色变换等各个方面^[5]。BT. 2020 色域标准覆盖了全部的 sRGB 和 Adobe RGB 色彩空间,而整个 DCI-P3 色域只有大约 0.02% 分布在 BT. 2020 色域之外,基本上可以忽略。诸如 HDR10、Dolby Vision、H. 264/MPEG-4 AVC、H. 265/HEVC 等视频图像编码标准支持 BT. 2020^[22-25],但是 BT. 2020 对 RGB 三原色纯度的要求过高,因此到目前为止没有满足其要求的成像技术,所以也没有真正的

BT. 2020 视频源。2016 年,ITU 推出了 Rec. ITU-R BT. 2100 标准^[26],针对高动态范围和宽色域的 UHD TV 进行标准定义,但与 BT. 2020 的色域范围完全相同。而且将来成像技术能够满足 BT. 2020 的技术要求时,覆盖可视色域的 63.3% 也绝不是技术发展的终点。此外,采用高饱和度三原色技术显示宽色域图像时,如果信源的色域范围大于显示器的色域范围,为了避免显示图像出现不自然的失真和细节丢失,色域映射是必须的^[4],即需要显示设备具备色域限制功能。

目前量子点技术在开发以 BT. 2020 色域为目标色域的显示设备时被广泛采用。2017 年, Kim 等^[27]提出并制造了一种使用图案化量子点薄膜和窄带滤波器(SPF)的光学高效液晶显示器((LCD)结构,红色、绿色和蓝色光谱的光强度分别增强到参考 LCD 值的 1.63、1.72 和 2.16 倍,色域覆盖率达到 BT. 2020 色域的 90% 以上。2020 年, Huraibat 等^[28]使用 BT. 2020 色域覆盖率为 81% 的飞利浦(Philips) Brilliance LCD 显示器测试基于量子点技术实现的多原色显示模型,其中,五原色(RGBCY)方案的色域面积达到 0.193,覆盖 BT. 2020 色域的 90% 以上。2022 年,肖功利等^[29]研制了一种新型的全介质圆环——纳米棒结构颜色滤波器,能够在特定的波段表现出较强的反射特性。通过改变纳米棒直径可实现宽色域颜色滤波特性,其形成的高纯度 RGB 三原色所覆盖的色域面积高达 0.115。此外,同年三星量子点显示屏在特定亮度下可显示的色域为 BT. 2020 的 90% 以上,获得了“真实色调”认证^[30]。

标准色域以及主流应用高饱和度三原色的宽色域标准如表 1 所示,可视色域与 Pointer 色域覆盖率采用更接近人眼感知的 CIE 1976 $u'v'$ 颜色空间。其中, ProPhoto RGB 超过了人眼可视色域的覆盖范围。

上述标准色域以及主流应用高饱和度三原色的宽色域标准对应的色度参数如表 2 所示,色域覆盖范围如图 5 所示。

表 1 标准色域与常用宽色域标准

Table 1 Standard color gamut and common wide color gamut standards

Color gamut	Year	Institution	Visible color gamut coverage / %	Pointer color gamut coverage / %
BT. 709	1990	ITU	33.2	70.2
Adobe RGB	1998	Adobe	38.7	80.3
ProPhoto RGB	1999	Kodak	> 90	100
DCI-P3	2007	SMPTE	41.7	85.5
BT. 2020	2012	ITU	57.2	99.7

表 2 标准色域与常用宽色域标准色度参数

Table 2 Standard color gamut and common wide color gamut standard chromaticity parameters

Color gamut	BT. 709		Adobe RGB		ProPhoto RGB		DCI-P3		BT. 2020	
Coordinates (CIE 1931)	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
R	0.640	0.330	0.640	0.330	0.735	0.265	0.680	0.320	0.708	0.292
G	0.300	0.600	0.210	0.710	0.160	0.840	0.265	0.690	0.170	0.797
B	0.150	0.060	0.150	0.060	0.037	0.000	0.150	0.060	0.131	0.046
Coordinates (CIE 1976)	<i>u'</i>	<i>v'</i>	<i>u'</i>	<i>v'</i>	<i>u'</i>	<i>v'</i>	<i>u'</i>	<i>v'</i>	<i>u'</i>	<i>v'</i>
R	0.451	0.523	0.451	0.523	0.623	0.506	0.496	0.526	0.556	0.517
G	0.125	0.563	0.076	0.576	0.050	0.592	0.099	0.578	0.056	0.587
B	0.175	0.158	0.175	0.158	0.050	0.000	0.175	0.158	0.160	0.126

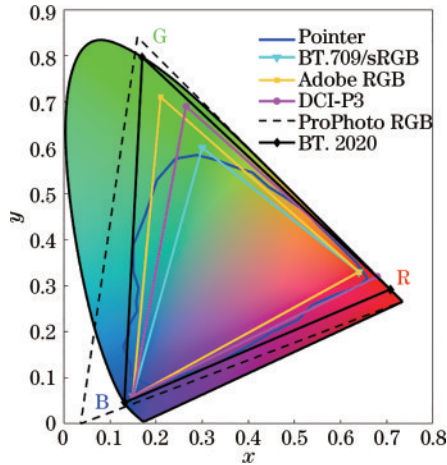


图 5 CIE 1931 *xy* 色度图中的标准色域、Pointer 色域和多种宽色域标准色域

Fig. 5 CIE 1931 *xy* chromaticity diagram of the standard color gamut, Pointer color gamut, and a variety of wide color gamut standards

3 基于多原色的宽色域技术

对于高饱和的原色技术,可以使用窄带彩色滤光片(CF)或光源获得高度饱和的 RGB 三原色,但是光谱宽度越窄,亮度就越暗。这种方法以牺牲颜色的亮度为代价。多芯片 RGB LED 具有极佳的色纯度,但需要单独且复杂的驱动电路^[31]。且其采用 RGB 三原色,色域范围仍然局限于某个三角形,即使理论上最大的三原色覆盖率也达不到人眼可视色域范围的 85% 以上^[32],无法精确再现色度图上一些高饱和度颜色,因此采用高纯度 RGB 三原色的应用极其受限。为了进一步扩大色域范围,多原色是必经之路^[33]。此外,多原色技术还具有节能的效果。根据人眼对红光并不敏感的视觉特性,针对现阶段通用的 RGB 三原色,可以考虑使用明视觉情况下光谱光视效率值更高的颜色来代替其中的红原色,这样在使用新的三原色混合成待匹配色光时便能够有效地降低能耗。Li 等^[34]添加 590 nm 的橙色色光(O)作为第 4 原色,将色度图中的 Δ RGB 分为 Δ RBO 和 Δ GBO,属于 Δ RBO 色域范围内的颜色将依旧由标准的红绿蓝三原色形成,而属于

Δ GBO 色域范围内的颜色将由橙绿蓝三原色混色形成。RGBO 四原色方案较标准的 RGB 三原色方案的平均节能效率约为 18.8%,最大节能效率高达 32.8%。鉴于显示器的应用非常广泛,无论是为了增加手机等电子设备的续航时间,还是为了节能减排的目标,越来越多的国家关注节能显示问题,而这需要多原色技术的帮助。

3.1 多原色成像技术

采用高饱和三原色的宽色域标准的色域范围仍然局限于某个三角形,难以覆盖更广的颜色空间。为了进一步扩大色域范围,学者们开始研究多原色方案。早在 1870 年,4 种原色的概念就被提出了,即黄、红、蓝、绿,被称为视觉对抗理论。为了能够高保真地重现色彩,需要在信源端提供多原色视频图像信息。多原色图像传感器早已进入市场,并且在近年取得了突破性进展。SONY 公司早在 2003 年就推出四原色图像传感器^[35],其 ICX456 和 Cyber-Shot DSC-F828 摄像机就采用 RGBE 四原色图像传感器。根据人类视觉系统对绿色的敏感度要高于红色和蓝色,SONY 在三原色基础上添加红色的补色,即宝石蓝色(E),对红色和绿色的忠实再现有很大的助益。不过该设备输出仍为 RGB 图像,因为没有标准支持四原色图像。

加利福尼亚大学、剑桥大学与麻省理工学院还联合研制了最多 5 个原色的多原色可转换图像传感器^[36],可以在同一相机中的 RGB、CMY 和 RGBCY 的多组颜色之间切换,能够在多种场景条件下提高颜色保真度,例如宽带滤光片 CMY 适用于低照度场景,而高照度场景需要窄带滤光片 RGB。图 6 展示了 RGB、CMY 与 RGBCY 成像与原图的对比,CIELAB 空间中的色差编码为灰度图像显示。美国犹他大学利用氮化硅对不同波长光的衍射率不同这一特性,研制了 25 个原色的单片图像传感器,其光敏度明显优于传统的拜耳阵列^[37]。

3.2 多原色显示技术

多原色显示技术有助于扩展色域,同时可能实现节能和提高分辨率等效果。Tomizawa 等^[38]和 Teragawa 等^[39]都强调了超越 RGB 三原色的多原色显

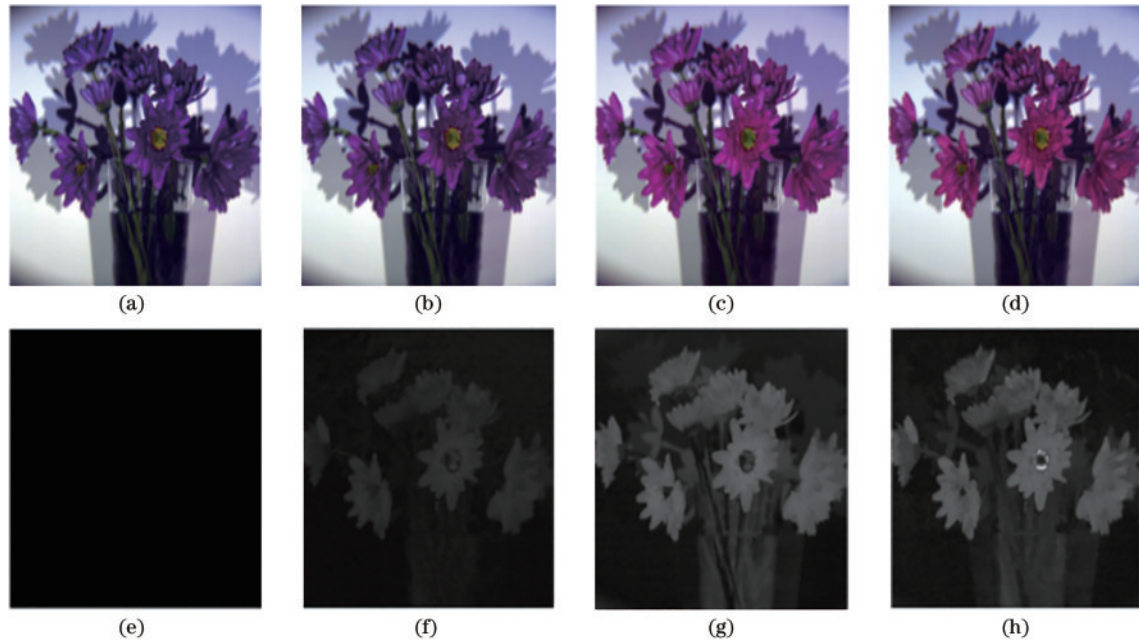


图 6 RGB、CMY 与 RGBCY 成像和色差对比^[36]。(a) 实际图像；(b) RGBCY 成像；(c) RGB 成像；(d) CMY 成像；(e) 实际图像色差；(f) RGBCY 色差；(g) RGB 色差；(h) CMY 色差

Fig. 6 Imaging and color difference comparison of RGB, CMY, and RGBCY^[36]. (a) Ground truth; (b) RGBCY imaging; (c) RGB imaging; (d) CMY imaging; (e) ground truth color difference; (f) RGBCY color difference; (g) RGB color difference; (h) CMY color difference

示的必要性。多原色显示系统按原色数量可划分为 4 原色、5 原色和 6 原色等。目前的色域标准不能有效覆盖人眼可见色域中的青色区域,导致需要高饱和度青色的显示情况会产生较大色差。而青色广泛应用于自然、航空、建筑、医疗等多个方面,例如沙滩浅滩水的颜色、天王星大气层中甲烷气体云的颜色、土耳其及中亚的一些建筑、用来减少血红色情绪反应的外科医生和护士的青色长袍等。黄色是拮抗理论^[40]中必不可少的颜色,它比 RGB 颜色理论更适合模拟人类视觉系统。根据视觉效果函数,人眼对黄色高度敏感,黄色区域的颜色辨别力更高^[41]。这意味着黄色能够以更低的输入电流达到相同的亮度,即实现更低的功耗。此外,亚洲人对黄色高度敏感,因为黄色接近他们的肤色。因此,目前常见的多原色组合形式包括“RGB+黄(Y)”“RGB+青(C)”“RGB+白(W)”“RGB+青(C)+黄(Y)”“RGB+青(C)+白(W)”“RGB+青(C)+黄(Y)+品红(M)”等^[42-43]。传统的多原色显示技术大都

采用 LED 背光液晶显示器面板^[44],例如日本 Sharp 公司 Quattron 系列的 LCD-80XU35A 就采用四原色。日本半导体能源实验室和中国台湾友达光电公司都开发了 RGBY 四原色 OLED 显示器,充分发挥四原色节能的优势^[45-47]。在被认为非常具有应用前景的 MicroLED 显示技术领域,日本学者还开发了每个像素尺寸仅有 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 的 RGBY 四原色显示器^[48]。Xiong 等^[42]以及 Yoshida 等^[49]分别对多种多原色显示模型的性能进行了实验或仿真,实验证明四原色显示系统的亮度分辨率相较于 RGB 三原色系统提高了 2 倍左右。

2010 年, LG^[50]和夏普^[51]均推出 RGBY 四原色相关研究成果,其中, LG 采用黄色提高发光效率从而提升亮度,并未扩展色域。夏普采用 RGBY 方案扩展色域,实现更亮的图像渲染效果,如图 7 所示。此外,该方案对于消除边缘锯齿等图像细节的再现和平滑更有优势。

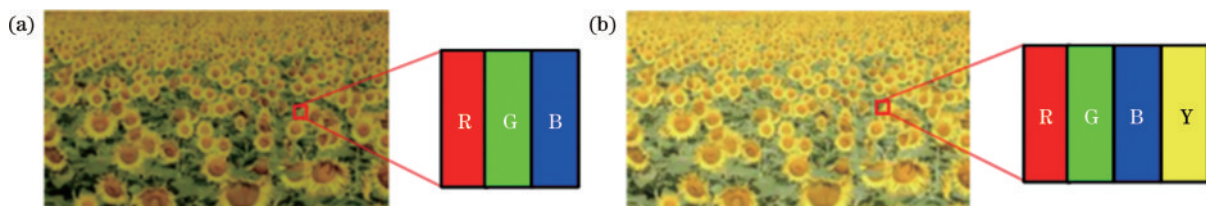


图 7 RGB 和 RGBY 显示以及子像素结构。(a) 传统 RGB; (b) 4 原色 RGBY

Fig. 7 Display and sub-pixel structure of RGB and RGBY. (a) Conventional RGB; (b) four-primary-color RGBY

Luo 等^[31]开发了一种通过空间和时间域混合色彩的四原色 LCD, 图 8 说明了该混合方法的图像生成机制。彩色图像被分成 4 个子图像, 分别对应 RGBY

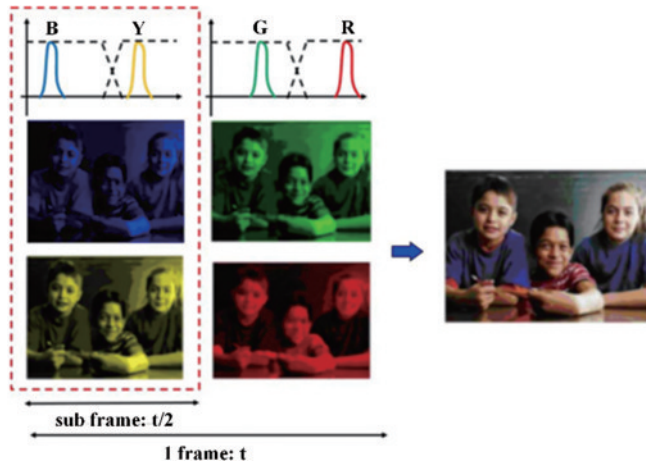


图 8 时空域四原色方法的图像生成^[31]

Fig. 8 Color generation of the spatiotemporal four-primary-color approach^[31]

4 个不同的原色。1 帧图像由 2 个连续的子帧组成。在第 1 个子帧期间, 蓝色 B 和黄色 Y 分量通过不同的滤波阵列分别点亮 2 个子像素。在第 2 个子帧期间, 绿色 G 和红色分量 R 透过不同的滤波阵列并点亮不同的子像素。2 个子像素对应的液晶阵列独立调制显示子图像。因此, 四原色图像显示可通过时序信号混合实现。与常规 RGB 三原色相比, 该方案的空间分辨率提高 1.5 倍, 在 CIE 1976 $u'v'$ 色度图中的面积可以达到 155% sRGB。

对于更多原色组合, 夏普公司研制出一款 60 寸的五原色 RGBCY 电视, 与传统 RGB 滤光阵列 [图 9(a)] 相比, 其子像素设计采用 6 子像素布局, 如图 9(b) 所示。滤光阵列额外添加了一个红色, 结构为 R_1CGR_2BY , 色域面积达到了 NTSC 色域的 110%^[52-53]。Cheng 等^[54] 基于红、绿、蓝、黄和青 (RGBCY) 等 5 种原色开发出了具有宽色域和高亮度的显示器, 能够同时扩展色域并且提高白色亮度, 从而降低显示功耗。

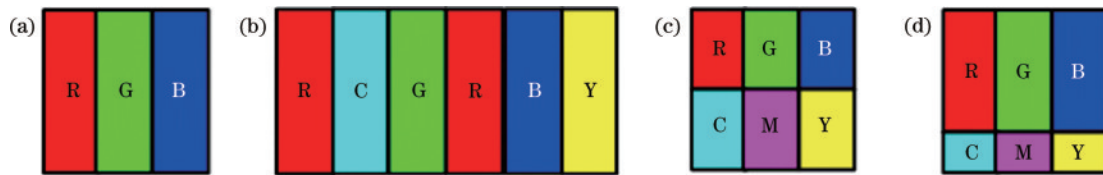


图 9 RGB、RGBCY 和 RGBCMY 彩色滤光阵列。(a) RGB; (b) RGBCY; (c) RGBCMY RGB:CMY=1:1; (d) RGBCMY RGB:CMY=3:1

Fig. 9 RGB, RGBCY, and RGBCMY color filter arrays. (a) RGB; (b) RGBCY; (c) RGBCMY RGB:CMY=1:1; (d) RGBCMY RGB:CMY=3:1

世界上第一款六原色显示器采用 RGBCMY 原色构成, 由三星株式会社成功研制^[55], 如图 9(c) 所示, 六原色彩色滤光阵列排布满足以下 3 点性质: 1) 同一行中颜色混合后为白色; 2) 同一列的颜色应互为补色, 例如红色 (R) 和青色 (C)、绿色 (G) 和洋红色 (M)、蓝色 (B) 和黄色 (Y); 3) 亮度较大的绿色应尽量排布在一行的中间, 有利于发光的均匀性。此外, 考虑到 CMY 整体比 RGB 亮度更大, 还对滤光阵列做了 RGB:CMY=3:1 的比例调整, 如图 9(d) 所示。杜比加拿大公司、以色列吉诺彩色技术有限公司及三星电子株式会社等公司已在国际上和我国申请宽色域显示器件和设备的专利, 提出了四原色、五原色甚至六原色的原色组合, 以获得更大的显示色域^[56]。

4 结 论

随着人们对视频图像显示质量的要求不断提高, 宽色域技术已经成为显示行业的研究热点。扩展色域的主要方法有传输“负”值色光、采用高饱和度的三原色以及多原色技术, 可以提高视频图像的感知质量。与 BT. 709 定义的标准色域 sRGB 相比, Adobe RGB、

DCI-P3、ProPhoto RGB 和 BT. 2020 等色域标准都通过增加原色的饱和度的方法来扩大色域范围, 可以综合各色域特点及用途来选择合适的目标色域。然而三原色的色域范围仍然局限于某个三角形, 考虑到对极致色域的追求, 多原色技术是实现更广色域的必经之路。但是若要通过多原色达到扩展色域的目的, 系统必须能够成像、兼容传输并显示多原色图像, 三者同时满足, 才能做到真实准确的颜色还原。目前还缺乏针对多原色视频图像信号的相关标准, 涉及诸多方面, 例如不同波长原色的添加, 多原色视频图像编解码以及标准的三原色与多原色成像、传输与显示系统的兼容性等软件方面的问题。此外, 为了能够真实准确地再现人眼可见的所有颜色, 对于硬件设备, 在成像与显示材料、背光结构、编解码器的复杂度与处理实时性等方面, 宽色域视频图像技术还需要继续展开研究。

参 考 文 献

- [1] 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): 23436-23448.
- [2] Parameter values for the HDTV standards for production

- and international programme exchange: ITU-R BT.709 [S]. Geneva: ITU, 2000.
- [3] 宇欣, 雷志春. 宽色域视频图像技术研究与发展[J]. 液晶与显示, 2020, 35(3): 262-271.
Yu X, Lei Z C. Overview on research and development of wide color gamut video image technology[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2020, 35(3): 262-271.
- [4] Zamir S W, Vazquez-Corral J, Bertalmio M. Vision models for wide color gamut imaging in cinema[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(5): 1777-1790.
- [5] Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange: ITU-R BT.2020[S]. Geneva: ITU, 2020.
- [6] Yurek J. Are tennis balls yellow or green[EB/OL]. (2018-03-22)[2023-03-19]. <https://dot-color.com/2018/03/22/are-tennis-balls-yellow-or-green/>.
- [7] Yurek J. Can an HDTV accurately reproduce these colors [EB/OL]. (2018-04-18) [2023-03-20]. <https://dot-color.com/2018/04/18/introducing-wide-gamut-wednesdays/>.
- [8] 吴超, 邱国平, 余新, 等. 基于区域调光的高动态范围激光显示[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(23): 2312003.
Wu C, Qiu G P, Yu X, et al. High dynamic range laser display based on area dimming[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(23): 2312003.
- [9] 王莉莉, 屠彦, 牟同升, 等. 新型显示视觉感知与健康研究进展[J]. 光电子技术, 2021, 41(4): 246-253.
Wang L L, Tu Y, Mou T S, et al. Research progress on visual perception and vision health for new display technologies[J]. Optoelectronic Technology, 2021, 41(4): 246-253.
- [10] 赵鹏, 余新, 杨亚涛. 基于光转向的高动态范围激光显示[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0512002.
Zhao P, Yu X, Yang Y T. High dynamic range laser display based on light steering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 0512002.
- [11] Son R. Quantum dot displays to spur premium display market growth[EB/OL]. (2019-12-09) [2023-03-20]. <https://omdia.tech.informa.com/OM006487/Display-Dynamics-Quantum-dot-displays-to-spur-premium-display-market-growth>.
- [12] Worldwide unified colorimetry and related characteristics of future television and image systems ITU-R BT.1361 [S]. Geneva: ITU, 1998.
- [13] Pointer M R. The gamut of real surface colours[J]. Color Research & Application, 1980, 5(3): 145-155.
- [14] Xu Y, Li Y, Li G L. A kind of nonlinear quantization method to extend the color gamut of DTV system[C]//2009 IEEE 13th International Symposium on Consumer Electronics, May 25-28, 2009, Kyoto. New York: IEEE Press, 2009: 141-143.
- [15] Zamir S W, Vazquez-Corral J, Bertalmio M. Gamut mapping in cinematography through perceptually-based contrast modification[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(3): 490-503.
- [16] Xu Y, Li Y, Li G L. Two kinds of methods to extend the color gamut of DTV system with extended quantization levels[C]//2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing, October 17-19, 2009, Tianjin, China. New York: IEEE Press, 2009.
- [17] Spaulding K E, Giorgianni E, Woolfe G J. Reference input/output medium metric rgb color encoding (RIMM/ROMM RGB) [C]//Image Processing, Image Quality, Image Capture Systems Conference, March, 2000, Portland, Oregon, USA. Springfield: IS&T, 2000: 155-163.
- [18] SMPTE engineering guideline-digital source processing—color processing for D-cinema: SMPTE. EG 432-1:2010 [S]. White Plains: SMPTE, 2010.
- [19] SMPTE recommended practice-D-cinema quality—reference projector and environment: SMPTE. RP 431-2: 2011[S]. White Plains: SMPTE, 2011.
- [20] Apple. Apple 以夺目的全新 Retina 显示屏更新 iMac 家族 [EB/OL]. (2015-10-13) [2023-03-21]. <https://www.apple.com.cn/newsroom/2015/10/13Apple-Updates-iMac-Family-with-Stunning-New-Retina-Displays/>.
Apple. Apple updates iMac family with eye-catching new Retina display screen[EB/OL]. (2015-10-13) [2023-03-21]. <https://www.apple.com.cn/newsroom/2015/10/13Apple-Updates-iMac-Family-with-Stunning-New-Retina-Displays/>.
- [21] Raikes B. WCG, HDR, QDs, and acronyms other[J]. Information Display, 2022, 38(5): 41-46.
- [22] Maxwell A. Dolby Vision vs. HDR10: what you need to know [EB/OL]. (2020-10-31) [2023-03-22]. <https://hometheaterreview.com/dolby-vision-vs-hdr10-what-you-need-to-know/>.
- [23] Dolby. Dolby vision content delivery for home distribution specification[EB/OL]. [2023-03-22]. https://professional.dolby.com/siteassets/content-creation/dolby-vision-for-content-creators/dolbyvisioncontentdeliveryhomedistributionspecificationv3_4.pdf.
- [24] Advanced video coding for generic audiovisual services: ITU-T H.264[S]. Geneva: ITU, 2019.
- [25] François E, Fogg C, He Y W, et al. High dynamic range and wide color gamut video coding in HEVC: status and potential future enhancements[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016, 26(1): 63-75.
- [26] Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange: ITU. BT.2100[S]. Geneva: ITU, 2016.
- [27] Kim H J, Shin M H, Lee J Y, et al. Realization of 95% of the Rec 2020 color gamut in a highly efficient LCD using a patterned quantum dot film[J]. Optics Express, 2017, 25(10): 10724-10734.
- [28] Huraibat K, Perales E, Viqueira V, et al. A multi-primary empirical model based on a quantum dots display technology[J]. Color Research & Application, 2020, 45(3): 393-400.
- [29] 肖功利, 陈剑云, 杨宏艳, 等. 全介质圆环-纳米棒结构宽色域颜色滤波器[J]. 光学学报, 2022, 42(19): 1923001.

- Xiao G L, Chen J Y, Yang H Y, et al. Wide color gamut color filter with all-dielectric ring-nanorod structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(19): 1923001.
- [30] Samsung. 摘得“白金”!三星显示获RBA最高评级[EB/OL]. (2022-01-10)[2023-03-21]. <http://samsungdisplay.com/chn/media/news/detail/ssdsNews-220110.jsp>. Samsung. Get ‘Platinum’! Samsung display received the highest RBA rating[EB/OL]. (2022-01-10)[2023-03-21]. <http://samsungdisplay.com/chn/media/news/detail/ssdsNews-220110.jsp>.
- [31] Luo Z Y, Wu S T. A spatiotemporal four-primary color LCD with quantum dots[J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(5): 367-372.
- [32] Lee J, Vigier T, Le Callet P, et al. Wide color gamut image content characterization: method, evaluation, and applications[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2021, 23: 3817-3827.
- [33] Yao B H, Zhu L Q, Deng L, et al. Upper limit of gamut volumes in multi-primary display systems[J]. *Optics Express*, 2022, 30(20): 36576-36591.
- [34] Li H R, Gao H, Kirca G, et al. Energy-saving display by color pixel re-representation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2020, 30(12): 4728-4738.
- [35] Realization of natural color reproduction in Digital Still Cameras, closer to the natural sight perception of the human eye [EB/OL]. (2003-07-16) [2023-03-21]. https://www.sony.com/en/SonyInfo/News/Press_Archive/200307/03-029E/.
- [36] Sajadi B, Hiwada K, Maki A, et al. Switchable primaries using shiftable layers of color filter arrays[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): 1-10.
- [37] Wang P, Menon R. Ultra-high-sensitivity color imaging via a transparent diffractive-filter array and computational optics[J]. *Optica*, 2015, 2(11): 933-939.
- [38] Tomizawa K, Nakamura K, Ueki S, et al. Multi-primary-color LCD: its characteristics and extended applications[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2011, 19(5): 369-379.
- [39] Teragawa M, Yoshida A, Yoshiyama K, et al. Review Paper: multi-primary-color displays: the latest technologies and their benefits[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2012, 20(1): 1-11.
- [40] Berns R S. Billmeyer and Saltzman’s principles of color technology[M]. Hoboken: Wiley, 2019.
- [41] Zhu L Q, Yao B H, Deng L, et al. Evaluation of gamut enhancement in yellow regions and a choice of optimal wavelength for a RGBY four-primary laser display system [J]. *Optics Express*, 2022, 30(21): 38938-38952.
- [42] Xiong Y, Deng F, Xu S, et al. Performance analysis of multi-primary color display based on OLEDs/PLEDs[J]. *Optics Communications*, 2017, 398: 49-55.
- [43] Masaoka K, Jiang F, Fairchild M D, et al. 61-2: color gamut of multi-chromatic displays[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 861-864.
- [44] 李亚生, 廖宁放, 李玉梅, 等. 广色域多基色显示系统的驱动图像生成方法[J]. *光学学报*, 2023, 43(1): 0133001.
- Li Y S, Liao N F, Li Y M, et al. Driving image generation method of wide color gamut multi-primary color display system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(1): 0133001.
- [45] Yamaoka R, Sasaki T, Kataishi R, et al. 70.1: high-resolution OLED display with the world’s lowest level of power consumption using blue/yellow tandem structure and RGBY subpixels[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46(1): 1027-1030.
- [46] Chen C C, Lee M T, Wu S F, et al. 70.3: low power consumption and wide color gamut AMOLED display with four primary colors[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46(1): 1035-1038.
- [47] Hui C K, Cheng S W, Sun W C, et al. P-41: optimization of sub-pixel area for multi-primary displays based on preferred image performance[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 1249-1252.
- [48] Kishino K, Sakakibara N, Narita K, et al. Two-dimensional multicolor (RGBY) integrated nanocolumn micro-LEDs as a fundamental technology of micro-LED display[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(1): 014003.
- [49] Yoshida Y, Nakagawa S, Yoshida A, et al. The luminance resolution characteristics of multi-primary-color display[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2011, 19(11): 771-780.
- [50] Han S H, Kim Y H, Yoon J M, et al. P-186: luminance enhancement by four-primary-color (RGBY) [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 1682-1684.
- [51] Yoshiyama K, Furukawa H, Kondo N, et al. 19.5L: Late-News paper: a new advantage of MultiPrimary-Color displays[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 281-282.
- [52] 孙炎. 多原色显示技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- Sun Y. Research on multi-primary color display technology[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [53] Ueki S, Nakamura K, Yoshida Y, et al. 62.1: five-primary-color 60-inch LCD with novel wide color gamut and wide viewing angle[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2009, 40(1): 927-930.
- [54] Cheng H C, Ben-David I, Wu S T. Five-primary-color LCDs[J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(1): 3-7.
- [55] Yang Y C, Song K, Rho S, et al. 31.1: development of six primary-color LCD[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2005, 36(1): 1210-1213.
- [56] 李彦. 宽色域HDTV系统兼容传输方案及其重显研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- Li Y. Research on compatible transmission and reproduction of extended gamut HDTV system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.