

全彩Mini-LED商业大屏显示的彩色管理

薛治天, 吕国强, 杜刚

引用本文:

薛治天, 吕国强, 杜刚. 全彩Mini-LED商业大屏显示的彩色管理[J]. 液晶与显示, 2021, 36(3): 448-455.

XUE Zhi-tian, LYU Guo-qiang, DU Gang. Color management of full-color Mini-LED commercial large screen display[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(3): 448-455.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0216>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于有限元的Mini-LED灭灯分析

Analysis of Mini-LED light-off phenomenon based on FEM simulation

液晶与显示. 2020, 35(1): 53-61 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203501.0053>

利用四原色降低显示器功耗方法的研究

Energy-saving method for displays based on four primary colors

液晶与显示. 2020, 35(12): 1248-1257 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203512.1248>

LED智能玻璃映射系统设计

Design of mapping software for LED smart glass display

液晶与显示. 2020, 35(10): 1019-1025 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203510.1019>

基于FPGA的LED屏控制器设计

Design of LED screen controller based on FPGA

液晶与显示. 2015(5): 838-843 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153005.0838>

LED显示屏相机采集过程中的渐晕补偿

Vignetting compensation in the collection process of LED display camera

液晶与显示. 2019, 34(8): 778-786 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193408.0778>

文章编号:1007-2780(2021)03-0448-08

全彩 Mini-LED 商业大屏显示的彩色管理

薛治天^{1,2}, 吕国强^{2,3*}, 杜 刚^{1,2}

(1. 合肥工业大学 电子科学与应用物理学院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 特种显示技术国家工程实验室 现代显示技术省部共建国家重点实验室
光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;

3. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:21 世纪初商业显示逐步发展成为一个独立的行业, 为了提升广色域全彩 Mini-LED 商业显示所呈现出的视觉效果, 针对当前 Mini-LED 拼接屏颜色还原效果不佳、色差较大且价格高昂等问题, 提出了一种应用于 Mini-LED 商业显示的色域映射方法。该方法基于 Mini-LED 的显示特性文件, 通过查找表与四面体插值运算对其进行色域映射, 再根据 Mini-LED 拼接屏对不同颜色特征的还原效果与表达能力之间的差异对查找表进行优化, 改善了映射精度、映射时间以及资源消耗之间的平衡。实验结果表明: Mini-LED 显示在进行色域映射后的最大亮度损失约为 3.5%, 像素光强均匀性由 8.2% 降至 4.9%, 色差由 $2.2\Delta E$ 降至 $1.3\Delta E$, 证明该方法对全彩 Mini-LED 商业显示在像素光强均匀性、色差等方面均有较好的矫正效果, 同时在视觉观测下的效果也有一定的提升。

关键词:色域映射; 商业显示; 全彩 Mini-LED; 色差矫正

中图分类号: TN383+.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2020-0216

Color management of full-color Mini-LED commercial large screen display

XUE Zhi-tian^{1,2}, LYU Guo-qiang^{2,3*}, DU Gang^{1,2}(1. School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of
Technology, Hefei 230009, China;2. National Engineering Lab of Special Display Technology,
National Key Lab of Advanced Display Technology,
Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, China;3. School of Instrumentation and Opto-Electronics Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: At the beginning of the 21st century, commercial display has gradually developed into an independent industry. In order to improve the visual effects presented by wide color gamut full-color

收稿日期: 2020-08-28; 修订日期: 2020-11-16.

基金项目: 安徽省科技重大专项(No.2019b05050001)

Supported by Science and Technology Major Project of Anhui Province(No.2019b05050001)

* 通信联系人, E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn

Mini-LED commercial display, to solve the problems of the poor color reproduction effect, large color difference and high price of the current Mini-LED splicing screen, a color gamut mapping method applied to Mini-LED commercial display is proposed. This method is based on the display characteristic file of Mini-LED, and the color gamut is mapped by the method of look-up table and tetrahedral difference. Then, according to the difference between the reduction effect and expression ability of different color features between Mini-LED splicing screens, the lookup table is optimized, and the balance of the mapping accuracy, mapping time and resource consumption is improved. The experimental results show that the maximum brightness loss of Mini-LED display after color gamut mapping is about 3.5%, and the uniformity of pixel intensity decreased from 8.2% to 4.9%, the color difference is reduced from $2.2\Delta E$ to $1.3\Delta E$, which proves that this method has a good correction effect for the full-color Mini-LED commercial display in pixel intensity uniformity, chromatic aberration and other aspects, meanwhile the effect under visual observation is also improved to a certain extent.

Key words: color gamut; commercial display; full-color Mini-LED; chromatic aberration correction

1 引言

自 20 世纪末起,显示领域主要通过电脑和家用电视进行表达。直到 2000 年后,随着科技的不断进步与创新,显示行业也随之得到了快速发展,其应用领域也从个人走向公众,商业显示也逐步成为一个独立的行业^[1]。

如今的商业大屏显示方式主要表达形式分为 3 种:数字光处理显示(Digital Light Processing, DLP)、液晶显示(Liquid Crystal Display, LCD)和发光二极管显示(Light Emitting Diode, LED)^[2]。这 3 种方式各有优缺点:DLP 显示在 3 种方式中光效最低,成像质量、分辨率等方面都表现得十分中庸,在价格方面也没有优势,所以目前的商业显示解决方案基本采用 LCD 显示或 LED 显示^[3];LCD 显示在分辨率、产生热量和维护成本等方面具有较大的优势,但其显示时受环境光影响较大且拼接缝隙明显,这些特点使 LCD 显示在室内显示等对亮度要求不高的环境下颇受欢迎,所以 LCD 显示成为了室内商业显示的中流砥柱;LED 显示由于发光原理和构造的不同,在实现了无缝拼接的同时又具有较好的颜色表达能力,且 LED 反应速度快,无重影、拖影等问题。近年来随着 Mini-LED 技术的日益成熟,高分辨率 LED 商显获得盛赞,但较高的成本限制了其普及化应用^[4]。

组成一个商业显示屏需要用不同批次、相同档次的 Mini-LED 进行混灯,这个过程是昂贵而

且耗时的,由其组成的 Mini-LED 显示屏仍可观测到较为明显的色差,造成这个问题的根本原因在于 Mini-LED 灯的生产工艺限制了其颜色还原能力^[5]。显示屏的分辨率越高意味着进行混灯的 Mini-LED 灯珠数目越多,色差现象也越明显。解决了 Mini-LED 间的色差问题,使其混灯的条件不再像如今这样严苛,价格昂贵的问题也随之解决。

本文针对 Mini-LED 显示中存在的色差现象,提出了一种基于 ICC 色彩特性文件,通过对 Mini-LED 商业显示屏模块之间的色域关系判断其目标色域,利用查找表(Look-up Table, LUT)与四面体插值运算的方式分别对每块拼接屏的色域进行映射,实现了色差矫正。其中针对 Mini-LED 商业显示屏在低灰阶部分较高灰阶部分色差更为明显的现象,通过利用不同的查找表密度改善了映射精度、映射时间与资源消耗之间的平衡^[6]。

2 目标色域的选取

Mini-LED 商业显示屏由数十个模组拼接而成,每个模组约由 10 个小拼接屏模块构成。每个模块由于其面积较小,灯珠数目较少所以采用合适的灯珠分选容易做到,在显示时无明显色差,但组成 Mini-LED 商业显示屏需要大量相同档次的模块,模块间的色差现象难以避免。为此,针对一系列模块如何选取一个合适的目标色域进行映射就显得尤为重要。

2.1 色域关系

任意两个色域之间的关系可以分为 3 类:如图 1 所示,完全重叠、完全不重叠和不完全重叠。

对于完全重叠的色域,可以将大色域的颜色映射到小色域中完成颜色的复现;对于完全不重叠的色域,无法实现颜色的映射;对于不完全重叠的色域,可以将两个色域的颜色各自映射到公共区域或靠近某一标准色域^[7]。



图 1 色域关系

Fig.1 Color gamut relation

2.2 目标色域

通过对某个由 36 个模组,共计 360 个模块组成的 Mini-LED 商业显示屏的测量结果发现,其色域关系只存在完全重叠和不完全重叠两种情况且色域间极为靠近,如图 2 与图 3 所示。

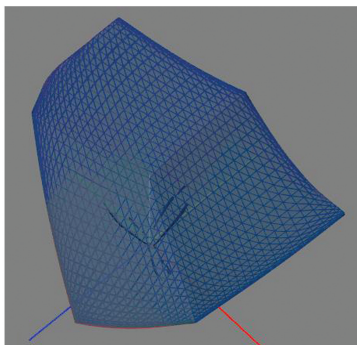


图 2 完全重叠的色域关系

Fig.2 Completely overlapping gamut relations

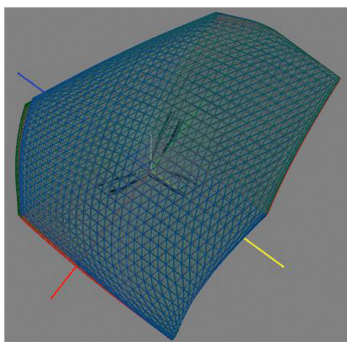


图 3 不完全重叠的色域关系

Fig.3 Color gamut relation of incomplete overlap

图 2 为随机挑选视觉观测条件下无色差现象的 3 个模块,分别用红色、绿色和蓝色轮廓描绘其 3D 色域图,可以看出其色域关系为完全重叠;图 3 选取了存在较为明显色差的 3 个模块,采用相同的方式比较其色域,可以看出其色域关系为不完全重叠,结果表明全部 Mini-LED 显示模块色域都极为接近但仍有差异。所以选择其色域最小的一个模块作为映射的目标色域即可,将其他模块的颜色映射到该目标色域中,对于 Mini-LED 显示的颜色损失和最大亮度损失都在可接受范围内。

3 插值运算

色域映射最主要的运算是插值运算,对于插值结点查找表中不包含的像素通道值,利用插值公式计算得到的结果近似替代。

3.1 几种不同的插值运算

色域映射过程中有 4 种较为常用的插值运算,分别是四面体插值运算、锥体插值运算、棱柱体插值运算和立方体插值运算^[8-11]。

上述几种插值运算的原理:当某像素点的像素值不是查找表中已存在的数据时,通过对该像素值临近的几个查找表中的像素值加权运算,从而得到该点的像素值。

3.2 插值运算对比

对于 4 种不同的插值运算,其对空间的分割、计算出目标像素值所需要的数据点数和在每次运算过程中的加法、乘法的次数决定了每完成一次映射所需要的数据量、数据精度以及运算时间都有所不同^[12],如表 1 所示。4 种插值运算中四面体插值运算较其他方法运算量最小,资源消耗最少。

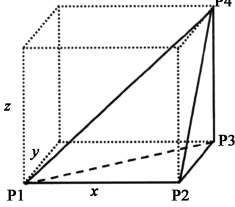
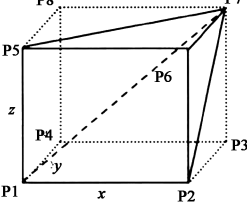
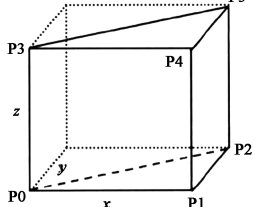
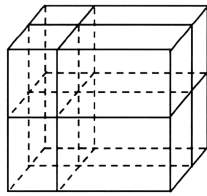
4 色彩管理与查找表优化

4.1 色彩管理

ICC 色彩特性文件(ICC Profile)是一组数据集,被广泛应用于色彩管理,其目的是实现在不同的设备间颜色保持一致,通过定义色彩空间相对于特性文件相关空间(Profile Connection Space, PCS),通常是 CIELAB($L^* a^* b^*$)或者(CIE XYZ)之间应如何进行色彩转换的方式来工作^[13]。色彩转换通过查找表的方式进行存储,未被存储的像素值则通过插值运算得到^[14]。

表 1 4种插值运算对比

Tab.1 Comparison of four interpolation algorithms

运算类型	四面体插值运算	锥体插值运算	棱柱体插值运算	立方体插值运算
模型				
数据点数	4	5	6	8
分割个数	6	3	2	1
加法次数	6	12	10	7
乘法次数	3	5	12	24

4.2 创建查找表

本文通过爱色丽 i1 display pro 仪器对显示器进行测量,得到每块拼接屏的 ICC 特性文件,通过仿真对特性文件中的标签数据提取分析,利用插值运算得到源色域和目标色域间的对应关系,建立查找表^[15]。

4.3 查找表优化

分别用 $33 \times 33 \times 33$ 、 $17 \times 17 \times 17$ 和 $9 \times 9 \times 9$ 三种大小的查找表完成相同的插值运算,并将三次映射结果相对比,发现显示器三通道颜色中红色表现良好,映射前在显示纯红色场图片时均观测不到色差现象,映射后纯红色场图片

颜色仍非常均匀且映射前后像素通道值无变化;在显示纯绿色场图片时可观测到轻微的色差现象,映射后纯绿色场图片颜色较为均匀,观测不到色差现象,映射前后绿色通道值变化较小;在显示纯蓝色场图片时色差现象最为明显,映射后纯蓝色场图片颜色均匀性有明显提升,绝大多数模块间不存在色差现象,仍有极少数模块存在微小色差。

对于 $33 \times 33 \times 33$ 和 $17 \times 17 \times 17$ 两种大小的查找表而言,映射后精度即通过查找表插值后的结果基本无差异,如表 2 和表 3 所示。

将 $17 \times 17 \times 17$ 和 $9 \times 9 \times 9$ 两种大小的查找

表 2 $33 \times 33 \times 33$ 数据Tab.2 $33 \times 33 \times 33$ data

模块编号	像素通道	原通道值	映射后值	原通道值	映射后值	原通道值	映射后值
01_01	R	31	31	127	127	239	239
	G	31	29	127	125	239	237
	B	31	28	127	124	239	234
03_05	R	31	31	127	127	239	239
	G	31	28	127	124	239	236
	B	31	28	127	124	239	233
10_24	R	31	31	127	127	239	239
	G	31	30	127	125	239	236
	B	31	28	127	124	239	235

表 3 17×17×17 数据
Tab.3 17×17×17 data

模块编号	像素通道	原通道值	映射后值	原通道值	映射后值	原通道值	映射后值
01_01	R	31	31	127	127	239	239
	G	31	28	127	125	239	237
	B	31	27	127	124	239	234
03_05	R	31	31	127	127	239	239
	G	31	28	127	124	239	236
	B	31	28	127	124	239	233
10_24	R	31	31	127	127	239	239
	G	31	30	127	125	239	236
	B	31	29	127	124	239	235

表映射结果相对比,结果表明绿色、蓝色像素通道值在不超过 120 时,17×17×17 大小的查找表映射精度要高于 9×9×9 大小的查找表,在其余部分两种大小的查找表映射精度基本无差异,如表 3 和表 4 所示。

表 2 为 33×33×33 大小的查找表在一次完整的色域映射前后编号为 01_01、03_05 和 10_24

的 3 个模块中 R、G、B 的像素通道值数据结果对比,完成一个模块的映射时间约为 4 h;表 3 为 17×17×17 大小的查找表选取相同的模块进行对比,完成一个模块的映射时间约为 0.5 h;表 4 为 9×9×9 大小的查找表选取相同的模块进行对比,完成一个模块的映射时间约为 4 min,映射时间随表格变小而大幅度降低。

表 4 9×9×9 数据
Tab.4 9×9×9 data

模块编号	像素通道	原通道值	映射后值	原通道值	映射后值	原通道值	映射后值
01_01	R	31	31	127	127	239	239
	G	31	28	127	125	239	237
	B	31	27	127	124	239	234
03_05	R	31	31	127	127	239	239
	G	31	27	127	124	239	236
	B	31	27	127	124	239	233
10_24	R	31	31	127	127	239	239
	G	31	29	127	124	239	236
	B	31	29	127	124	239	235

实验结果表明,在 $G \leq 120$ 和 $B \leq 120$ 两种情况下使用 17×17×17 大小的查找表,在剩余部分使用 9×9×9 大小的查找表进行映射可以在不损失精度的情况下最大程度地减少映射时间和资源消耗。

5 Mini-LED 综合性能对比

5.1 最大亮度损失

在色域映射过程中将大色域作为源色域,最

小的色域作为目标色域,所以在色域映射后最大亮度和颜色均会有一定的损失^[16],通过控制卡将 Mini-LED 峰值亮度调整为 $1\,500\text{ cd/m}^2$,在进行色域映射后测得整屏最大亮度约为 $1\,447\text{ cd/m}^2$,由此计算可得进行色域映射后该屏最大亮度损失约为 3.5%。

5.2 像素光强均匀性

对于商业显示 Mini-LED 大屏,像素光强均匀性测试方法通常采用 2007 年颁布的电子行业标准 SJ/T11281-2007《LED 显示屏测试方法》^[17],该方法虽然可以评估整块屏的像素光强均匀性,但由于商业显示大屏是由上百块小模块拼接而成,其色差现象和像素光强的不均匀主要来源于模块间的差异,应用传统方法用 30 个像素值作为测量结果替代整屏不能真实反映商业显示大屏的像素光强均匀性,所以本文提出了一种应用于 Mini-LED 商业显示大屏的评估像素光强均匀性方法,根据 Mini-LED 模块数确定取样分区数,本文选取的 Mini-LED 大屏共有 360 个模块,分为 360 区,提取每个取样分区中心点的亮度值作为样本,使每个样本处于最高灰度等级,分别显示纯红场、纯绿场和纯蓝场,测得每个样本点显示 3 种颜色的光照强度 I_R 、 I_G 和 I_B ,所有样本点平均值计算结果记为 $\bar{I}$,计算过程如式(1)所示:

$$I_R = \frac{|I_i - \bar{I}_R|_{\max}}{\bar{I}_R} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

$$I = \sum_{i=1}^{360} \frac{I_i}{360}, \quad i=1 \sim 360, \quad (2)$$

分别计算出 I_R 、 I_G 和 I_B ,3 次计算结果的最大值记为 I_{pj} , I_{pj} 即为该显示器的最大像素光强均匀性,该值越大说明显示器光照强度差异越明显,如表 5 所示^[18]。

表 5 像素光强均匀性分级

Tab.5 Uniformity classification of pixel intensity

A 级	B 级	C 级
$25\% < I_{pj} < 50\%$	$5\% < I_{pj} < 25\%$	$I_{pj} \leq 5\%$

未映射前 Mini-LED 商业显示测试屏的像素光强均匀性为 8.2%,在经过色域映射后该屏

幕像素光强均匀性降至 4.9%,有效证明了 Mini-LED 在经过色域映射后整屏的像素光强均匀性有明显的提升,在主观观测条件下亮度也显得更为均匀。

5.3 色差校正

色差测试采用不同灰度级和不同亮度级的纯红图片、纯绿图片、纯蓝图片、灰阶图片以及随机混色图片,这样可以使测试图片更广泛地散布在色域空间,可以更好地反映显示器整体颜色情况^[19]。进行色域映射前 Mini-LED 屏的色差计算结果为 $2.2\Delta E$,映射后整屏色差计算结果为 $1.3\Delta E$,有效证明了该色域映射方法可应用于 Mini-LED 显示器的彩色管理且效果理想。

6 结 论

本文针对全彩 Mini-LED 商业大屏显示的特性,提出了一种应用于全彩 Mini-LED 商业大屏显示的彩色管理方法,在保证色域映射精度的同时大幅缩减了映射时间。首先根据商业显示大屏模块间色域差距较小,但由于大屏的“放大”特性在视觉观测的条件下仍有明显的色差现象,针对该现象对显示器进行有效的色域映射。在色域映射时选择四面体插值运算可以大幅度节约时间成本,然后通过对 $33 \times 33 \times 33$ 、 $17 \times 17 \times 17$ 和 $9 \times 9 \times 9$ 三种大小的查找表映射结果进行对比。实验结果表明,在 $G \leq 120$ 和 $B \leq 120$ 两种情况下使用 $17 \times 17 \times 17$ 大小的查找表,在剩余部分使用 $9 \times 9 \times 9$ 大小的查找表可以在不影响精度的条件下大幅度减少硬件资源消耗,从而减少映射所需时间。在进行色域映射前后,Mini-LED 商业显示大屏的像素光强均匀性由 8.2% 降至 4.9%,最大亮度损失仅为 3.5% 左右,可达到人眼基本不可分辨的范围内,整屏色差由 $2.2\Delta E$ 降至 $1.3\Delta E$,在人眼观测条件下无明显色差现象。该方法在对 Mini-LED 商业显示大屏进行颜色管理时起到了良好的作用,在最大亮度损失极小的情况下对像素光强均匀性和色差方面都有明显的提升效果,可以证明应用该方法可以高效地对 Mini-LED 进行彩色管理,为 Mini-LED 未来发展方向提供一定的参考价值。

参 考 文 献:

- [1] 徐丰. Mini LED 将切入大屏显示市场[N]. 中国电子报, 2020-03-13(007).
XU F. Mini LED will enter the large screen display market [N]. *China Electronic News*, 2020-03-13(007). (in Chinese)
- [2] SUN Q L. Research on scheme selection of large screen display system in traffic emergency monitoring center based on cloud service [C]//*Proceedings of 2019 International Conference on Information Science, Medical and Health Informatics*. Paris: Computer Science and Electronic Technology International Society, 2019: 597-602.
- [3] 冯思悦, 梁静秋, 梁中翥, 等. LED 微阵列投影系统设计[J]. 中国光学, 2019, 12(1): 88-96.
FENG S Y, LIANG J Q, LIANG Z Z, *et al.* Design of projection system for a micro-LED array [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 88-96. (in Chinese)
- [4] 李继军, 聂晓梦, 李根生, 等. 平板显示技术比较及研究进展[J]. 中国光学, 2018, 11(5): 695-710.
LI J J, NIE X M, LI G S, *et al.* Comparison and research progress of flat panel display technology [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 695-710. (in Chinese)
- [5] 林伟瀚, 杨梅慧. Mini-LED 显示与 Micro-LED 显示浅析[J]. 电子产品世界, 2019, 26(7): 65-67.
LIN W H, YANG M H. Analysis of miniled display and Micro-LED display [J]. *Electronic Engineering & Product World*, 2019, 26(7): 65-67. (in Chinese)
- [6] 薛治天, 王正茂, 杨宇飞, 等. sigmoid 函数的高效率硬件实现研究[J]. 电子测试, 2018(16): 37-39.
XUE Z T, WANG Z M, YANG Y F, *et al.* Research on high efficiency hardware implementation of sigmoid function [J]. *Electronic Test*, 2018(16): 37-39. (in Chinese)
- [7] PARK J, LEE B U. Color image enhancement with high saturation using piecewise linear gamut mapping [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2020, 67: 102759.
- [8] PUGSLEY P C. Image reproducing methods and apparatus; UK, 1369705 [P]. 1974.
- [9] FRANKLIN P E. Interpolation methods and apparatus; USA, 4334240 [P]. 1982-06-08.
- [10] KANAMORI K, KOTERA H, YAMADA H, *et al.* Fast color processor with programmable interpolation by small memory [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1993, 2(3): 213-224.
- [11] KASSON J M, NIN S I, PLOUFFE W, *et al.* Performing color space conversions with three-dimensional linear interpolation [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1995, 4(3): 226-250.
- [12] OUYANG J T, LYU B J, PENG D Z, *et al.* A color gamut mapping reducing the influence of IR-drop in OLED displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(S1): 985-987.
- [13] 王婉君. 基于 ICC.2 色彩管理系统框架的构建[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
WANG W J. Building a color management system based on ICC.2 [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [14] GOUTZOLIS A P, MALARKEY E C, DAVIES D K, *et al.* Optical processing with residue LED/LD lookup tables [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(9): 1674-1681.
- [15] 杨海钢, 孙嘉斌, 王慰. FPGA 器件设计技术发展综述[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 714-727.
YANG H G, SUN J B, WANG W. An overview to FPGA device design technologies [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(3): 714-727. (in Chinese)
- [16] 李琦. RGB-LED 背光液晶显示器的色域映射算法研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
LI Q. Research on gamut mapping algorithm of RGB-LED backlit LCD [D]. Jinan: Shandong University, 2009. (in Chinese)
- [17] 陆荣庆. LED 显示屏行业标准及贯标检测情况简述[J]. 液晶与显示, 2007, 22(6): 780-784.
LU R Q. General introduction to LED panel standards & testing conditions [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(6): 780-784. (in Chinese)
- [18] 白燕燕. LED 显示屏亮度均匀性评价方法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
BAI Y Y. Research on the evaluation method of luminance uniformity of LED display [D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)

- [19] 梁监天.显示器实时色彩管理方法研究[D].合肥:合肥工业大学,2016.
LIANG J T. Real-time color management method for display [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
(in Chinese)

作者简介:



薛治天(1996—),男,吉林长春人,硕士研究生,2018年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事 Mini-LED、色域映射技术以及 SoC 等方面的研究。E-mail: 627471126@qq.com



吕国强(1962—),男,浙江新昌人,硕士,教授,1986年于浙江大学获得硕士学位,主要从事立体显示、液晶显示等方面的研究。E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn