

# 基于几何光学的高动态范围视频显示系统 背光模组的设计与实现

张涛<sup>1</sup>, 邱亮<sup>1\*</sup>, 巫红英<sup>1</sup>, 雷志春<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>天津大学电子信息工程学院, 天津 300072;

<sup>2</sup>西鲁尔应用科技大学传感器与检测研究所, 北莱茵-威斯特法伦州 米尔海姆 45468

**摘要** 从几何光学的角度设计并实现高动态范围视频显示系统的背光模组。首先明确背光模组亮度均匀性对高动态范围视频显示系统的重要影响, 并通过斯派罗法则确定背光模组 LED 光源的间距、混光距离等设计参数, 随后利用 AutoCAD 软件进行三维建模, 利用 TracePro、LightTools 光学软件进行仿真实验, 并通过改造现有显示屏幕的背光模组来实现高动态范围视频显示系统。结果显示: 设计与实现的背光模组能够达到高动态范围视频显示系统的要求, 液晶面板的峰值亮度可达  $2500 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , 亮度均匀性为 95.85%。

**关键词** 几何光学; 高动态范围; 亮度均匀性; LED 间距; 混光距离

**中图分类号** TN27; O435 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.100801

## Design and Implementation of Backlight Module of High Dynamic Range Video Display System Based on Geometrical Optics

Zhang Tao<sup>1</sup>, Qiu Liang<sup>1</sup>, Wu Hongying<sup>1</sup>, Lei Zhichun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Electric Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>Institute of Sensors and Measurements, Ruhr West University of Applied Sciences, Mülheim, North Rhine-Westphalia 45468, Germany

**Abstract** The backlight module of high dynamic range video display system based on the geometrical optics is designed and accomplished. First, the important influence of luminance uniformity of backlight module on the high dynamic range video display system is determined. And the design parameters, such as the spacing and the light mixing distance of LED light sources of backlight module, are determined by Sparrow's criterion. Then, the AutoCAD software is used to conduct 3D modeling. TracePro and LightTools are taken in the simulation experiment. The high dynamic range video display system is built by modifying the backlight module of the existing display screen. The results show that the designed and accomplished backlight module in this paper can meet the requirements of high dynamic range video display system. Peak brightness of liquid crystal display panel can reach  $2500 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  and uniformity of luminance is up to 95.85%.

**Key words** geometric optics; high dynamic range; luminance uniformity; LED spacing; light mixing distance

**OCIS codes** 080.2740; 220.2740; 230.3720

## 1 引言

自然界因蕴含着大约 14 个数量级范围的亮度信息而绚丽多彩, 人眼通过自身的调节能够识别其中的 5 个数量级, 目前绝大多数显示器只能表现出 2 个数量级的亮度信息<sup>[1]</sup>。高动态范围(HDR)显示的图像拥

**收稿日期:** 2017-04-18; **收到修改稿日期:** 2017-05-19

**基金项目:** 天津市科技支撑计划重点项目(16YFZCGX00760)

**作者简介:** 张涛(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事音视频处理和复杂嵌入式系统优化方面的研究。

E-mail: zhangtao@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: vineyard@tju.edu.cn

有大幅度拓展对比度和色彩的能力,画面中呈现出的明亮部分更为明亮,较暗部分兼具足够的细节,进而使其看上去更具“深度”。同时,色彩的拓展让颜色具有明亮而纯粹的效果,让画面显得更加真实,更能为人眼所识别。

传统显示设备在再现高动态范围视频图像时能力有限,这就导致了人眼在感受真实环境与显示图像时极不匹配。高动态范围显示设备的研制是解决这个问题的关键。现有的高动态范围显示系统以有机发光二极管(OLED)自发光高动态范围显示器设计方案和基于发光二极管(LED)背光与液晶显示器(LCD)显示屏相结合的双屏设计方案为主要趋势。与 OLED 设计方案相比,以 LED 为背光源的设计方案在设计成本、工艺等方面具有很大的优势,主要的研究成果有:Ledda 等<sup>[2]</sup>提出的采用 LED 背光源,LED-LCD 双屏显示的设计方案;Burini 等<sup>[3]</sup>提出的背光随亮度可调的 LED 设计模型;段绿茵<sup>[4]</sup>设计的一种非均匀背光高动态范围显示器设计方案。这类基于背光源分区域控制设计实现的高动态范围视频显示系统方案,是根据高动态范围图像内容中不同的亮度分布,相应地调节背光区域 LED 所需要的亮度,从而提升系统显示图像时的动态范围。然而,却未明确高动态范围视频系统光源的 LED 阵列布局及混光距离。基于此,本文将在确保每一分区具有高亮度的设计目标前提下,利用几何光学的相关理论确定高动态范围背光模组的 LED 布局参数以及背光深度,并通过 LightTools、TracePro、AutoCAD 等设计软件对背光模组进行光学设计与实验仿真,设计出满足高动态范围视频显示系统的高亮度、高均匀度的背光模组。

## 2 光学设计

### 2.1 光学设计理论

目前,采用 LED 背光源区域控制的高动态范围显示系统背光分区数与液晶像素点之间还达不到一一对应,需要将 LED 产生的点光源转换成均匀的面光源,进而为具有相同亮度的图像在不同区域显示效果的一致性提供保障。因此,设计出具有高亮度均匀性的背光模组是高动态范围显示系统的重要目标。影响高动态范围视频显示系统亮度均匀性的因素主要包括照度的均匀性、膜片的选择、观察方向的选择等,其中背光模组照度的均匀性是制约显示系统亮度均匀性的关键。而在近场光学系统设计中,LED 布局以及混光距离对背光照度均匀性的影响尤为重要。

下面将从推导单个 LED 照度均匀性的影响因素入手,得出整个影响背光模组亮度高均匀性的因素<sup>[5-6]</sup>,从而得到高动态范围视频显示系统背光模组 LED 光源的布局和混光距离。

单个 LED 可被视为近似朗伯型光源,即 LED 的光强分布为发射角余弦的多次方函数<sup>[7-8]</sup>:

$$I(\theta) = I_0 \cos^m \theta, \quad (1)$$

式中, $I_0$  为 LED 法线方向光强; $\theta$  为实际测量方向与法线方向的夹角; $I(\theta)$  为实际测量方向光强。 $m$  值取决于 LED 芯片与 LED 封装透镜曲面中心点的相对位置,当  $m=1$  时,芯片的位置在封装曲面透镜的曲率中心点上,为理想朗伯型光源。由光强的物理定义可知,立体角  $\Omega$  的光通量为  $I(\theta) d\Omega$ ,取 LED 发光面元为  $A$ ,被照射面元为  $B$ , $A$  与  $B$  之间的中心距离为  $r$ ,则面元  $B$  上的照度  $E_s$  可表示为<sup>[9]</sup>:

$$E_s = I(\theta) d\Omega / dS = I_0 \cos^m \theta \cos^m \alpha / r^2. \quad (2)$$

在直下式背光模组中,面元  $A$  与面元  $B$  是平行的,并由此可得  $\theta = \alpha$ 。当接收面元远大于发射面元时,假定发射光源为微小发射面元。由此,可得单个 LED 的照度为:

$$E_s = I(\theta) d\Omega / dS = I_0 \cos^{2m} \theta / r^2. \quad (3)$$

由单个 LED 的照度表达式推导出任意多个 LED 照度关系。在三维直角坐标系中,设任意点的照度为  $E(x, y, z)$ ,横向相邻两个 LED 间距为  $\Delta_x$ ,纵向相邻两个 LED 的间距为  $\Delta_y$ , $z$  为发射面元到接收面元的垂直距离。则任意 LED 坐标  $L_{ij}$  可表示  $[x_0 + (i-1)\Delta_x, y_0 + (j-1)\Delta_y]$ 。在接收面上任意一点  $A_{ij}$  与点  $L_{ij}$  的距离可表示为:

$$r_{ij} = \sqrt{[x_0 + (i-1)\Delta_x]^2 + [y_0 + (j-1)\Delta_y]^2 + z^2}. \quad (4)$$

则任意 LED 到  $A_{xy}$  领域的照度可以表示为:

$$E(x, y, z) = \sum_{i=0}^M \cdot \sum_{j=0}^N \frac{I_0 \cos^{2m} \theta}{r_{ij}^{(m+2)/2}}, \quad (5)$$

式中,  $M$ 、 $N$  表示背光板共有  $M$  行  $N$  列个 LED。

将斯派罗法则解决最大限度平坦条件的原理用于背光模组照度均匀性上<sup>[10]</sup>, 对(5)式求两次偏导,  $(\partial^2 z)/(\partial x^2)=0$  时, 由  $(x, y)$  位置便可确定  $z$ 、 $\Delta_x$ 、 $\Delta_y$ 、 $\theta$  的关系。

为了计算简化, 可根据 LED 阵列排列方式确定  $\Delta_x$ 、 $\Delta_y$  的关系。图 1(a) 为等距离矩形排列, 图 1(b) 为三角形排列, 图 1(c) 为菱形排列。在这三种常见的 LED 阵列排列中, 三角形阵列和菱形阵列比矩形阵列有更好的照度均匀性<sup>[11-13]</sup>。因此, 设计选用三角形阵列的排列方式, 交替缩进二分之一的距离, 并设  $\Delta_x = \rho \Delta_y$ 。利用 Matlab 软件进行求解计算, 当  $\rho=0.5$  时, 有关系式:

$$\Delta_x = 2 \cdot z \cdot \tan \theta. \quad (6)$$

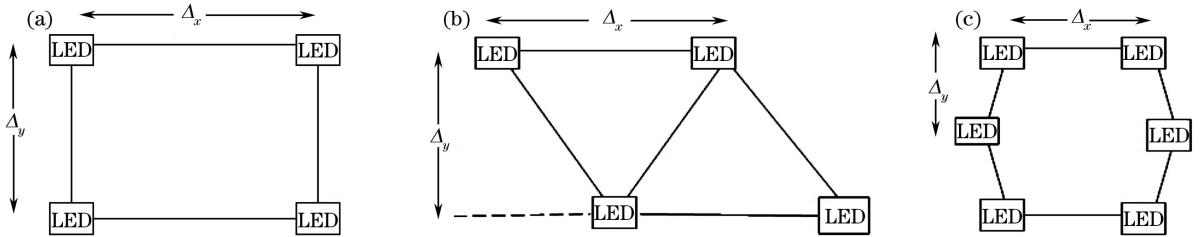


图 1 不同排列的 LED 阵列示意图

Fig. 1 Schematic of different configurations of LED arrays

直下式背光模组的增亮膜(BEF)层的透射率与发射角度  $\theta$  存在一定的关系, 入射角  $\theta$  在  $10^\circ \sim 20^\circ$  的范围内, 照度均匀性达到最大值<sup>[14]</sup>。另外, 背光腔选择镜面反射或漫反射时, 角度的选择都会有所不同<sup>[15]</sup>。

在高均匀度的设计目标前提下, 结合  $z$ 、 $\Delta_x$ 、 $\Delta_y$ 、 $\theta$  的关系式, 考虑 LED 的排列方式和发射角  $\theta$  的影响因素, 便可得到高动态范围视频显示系统背光模组 LED 的布局和混光距离。

## 2.2 背光模型

### 2.2.1 背光叠层结构

背光系统采用直下式背光结构, 光源由 LED 按照一定规律排布在显示区域底部。在 LED 背部添加一层有特殊结构的反光膜, 将 LED 射向后端的光反射回前端的扩散膜, 过扩散膜后, 先经一层扩散片的作用使光线进一步均匀, 再通过两片正交的 BEF 棱镜膜和扩散片后到达背光面板, 并为其提供所需的亮度。膜片组比一般的设计有所增加, 但考虑到高动态范围视频显示系统的特殊要求和特点, 背光系统的整体出光均匀性和亮度都比侧光式的有所提高。整个背光系统的叠层结构详见表 1 所示。

表 1 背光模组的叠层结构

Table 1 Stack structure of the backlight module

No	Part	Height /mm
1	Reflector film	0.2
2	Diffuser plate	2
3	Diffuser film (down)	0.23
4	BEF	0.4
5	Diffuser film (up)	0.23

背光系统的叠层是在 LightTools 中的 Utility Library 实用库 Backlight Utility 基础上, 经过多次实验增加和改进的结构。其中, 反散膜为 0.2 mm, 扩散板为 2 mm, 上下扩散膜均为 0.23 mm, 中间加的超微距多晶体结构增亮膜(BEF)层为 0.4 mm。

### 2.2.2 背光模组模型的搭建

背光模组模型的搭建, 选用的是以 ACIS solid modeling kernel 为基础的 TracePro 光学软件以及 Optical Research Associates (ORA ©) 公司设计的 LightTools 光学软件。两款软件都普遍用于照明系统和背光系统的光学分析、辐照度分析以及光度学分析的光线模拟。在同等条件下, LightTools 光学软件比 TracePro 软件的仿真速度, 特别是在亮度(灰度)的仿真上, 表现得更为出色, 其仿真结果与实际结果更接近, 但 TracePro 软件照度分析功能的仿真更易上手。设计采用 TracePro 软件进行背光模组的照度分析, 对

于高动态范围视频显示系统需要的高亮度信息,用 LightTools 光学软件进行亮度分析,两款软件以普通的 SAT 文件格式进行交互。背光模型的建立利用 AutoCAD 软件中的绘图工具,绘制背光腔、膜片组等基本三维模型。背光模型(40 in,1 in=2.54 cm)示意图如图 2 所示。

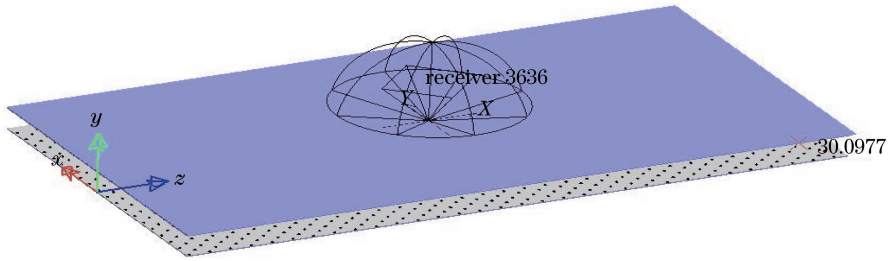


图 2 直下式背光模组示意图

Fig. 2 Diagram of direct-type backlight module

实验采用普通的 LG 40 in 液晶显示器为实验平台,屏幕比例为 16:9,40 in 屏幕的对角线长为  $40 \times 2.54 \text{ cm} = 101.6 \text{ cm}$ ,背光面积参数为  $885.6 \text{ mm} \times 498.15 \text{ mm}$ 。背光板光源由朗伯型的 LED 所提供,每个 LED 光通量为 150 lm。模型搭建选择理论分析所确定的参数设计和常见的三角形排列方式,其中,选择较为常见的等边三角形、等腰三角形和等腰直角三角形作为实验对象。在  $\theta = 20^\circ$ ,交替缩放二分之一不变的情况下,由上述关系可得等边三角形  $\Delta_x = 26 \text{ mm}$ 、 $\Delta_y = 22 \text{ mm}$ 、 $z = 36 \text{ mm}$  的分布方式,同样可得  $\Delta_x = 26 \text{ mm}$ 、 $\Delta_y = 12 \text{ mm}$ 、 $z = 36 \text{ mm}$  的等腰三角形分布方式和  $\Delta_x = 26 \text{ mm}$ 、 $\Delta_y = 26 \text{ mm}$ 、 $z = 36 \text{ mm}$  的等腰直角三角形的分布方式。图 3 是以横向 LED 的间距为 2.6 cm,纵向间距为 1.2 cm,LED 混光距离为 3.6 cm 的布局方式,作为背光板模型示意图,膜层之间的间隙设置为 0.1 mm,背光系统使用的 LED 总数量为 1292 个。同时使用扩散板、下扩散片、BEF、上扩散片的膜片组,边缘部分使用胶框和遮光板来完成光学膜片的固定和遮光作用,整个背光模组的厚度控制在 40 mm 以内。

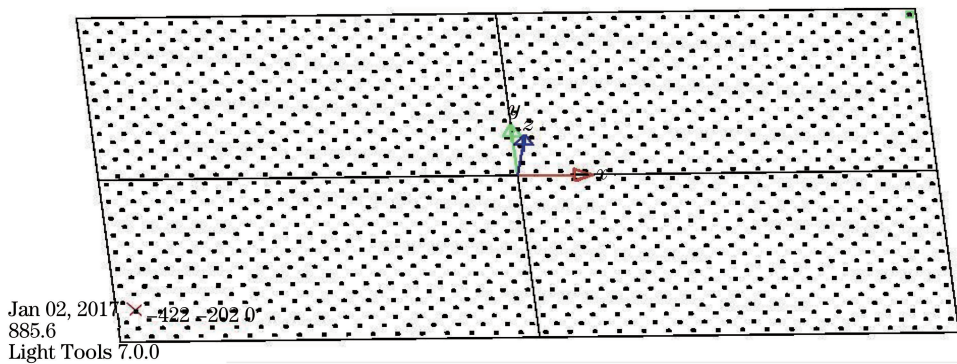


图 3 高动态范围显示系统的背光模组 LED 布局示意图

Fig. 3 Diagram of LED layout of backlight module of HDR display system

### 3 软件仿真与实现

在建立背光模组模型的基础上,设置好光源的相关参数和膜片组的光学属性。实验光源均以  $3.5 \text{ mm} \times 2.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$  的矩形体模拟 LED 光源,光线仿真选用 15 万条光线,几种排列方式均选取  $1000 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$  大小的观察面,观察距离均设置在 40 mm 处。照度均匀性通常是指单位面积内最小照度与最大照度之间的比值,与 LED 功率大小无关。在不影响实验结果的前提下,几种排列方式选用了不同的功率,其照度图如图 4、图 5 所示。

从实验仿真结果来看,以等边三角形排列得到的背光模组在照度均匀性方面的实验数据比等腰三角形排列、等腰直角三角形排列的好,光效利用率可达 96.448%,照度均匀性远超过行业标准《数字电视液晶显示

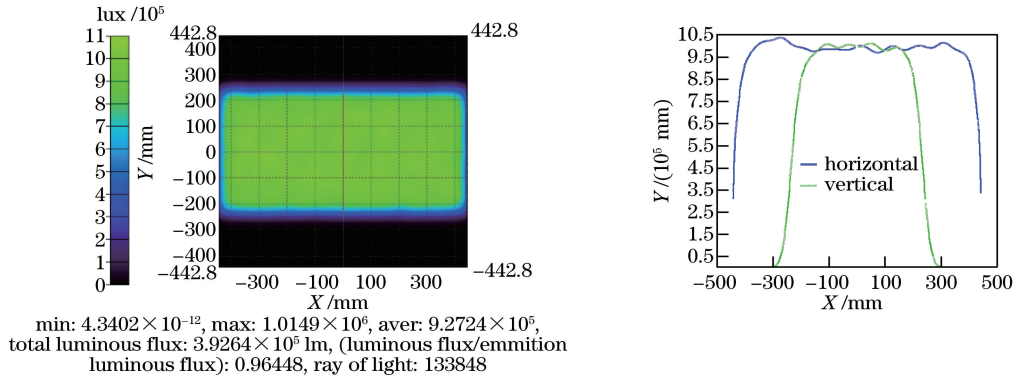


图 4 以等边三角形排列的高动态范围显示系统背光模组照度图

Fig. 4 Illuminance graph of backlight module of HDR display system with equilateral triangle arrangement

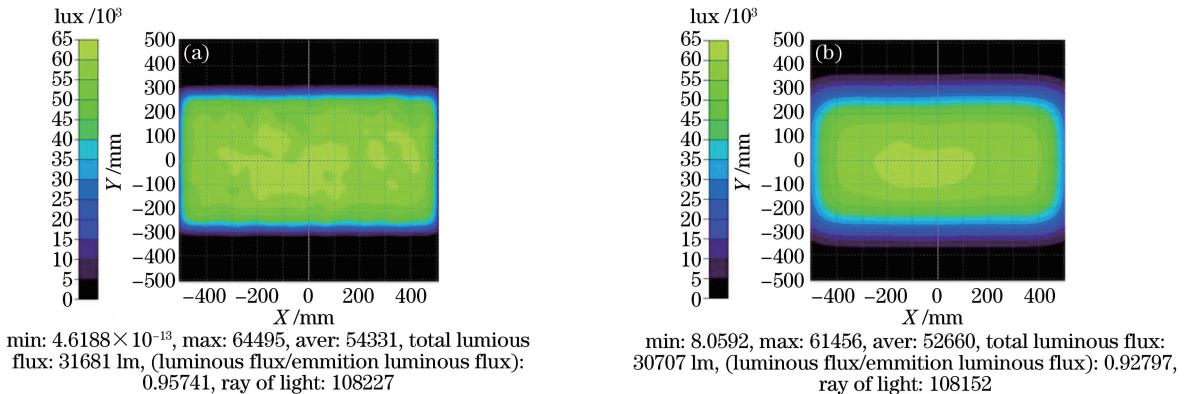


图 5 (a)等腰三角形、(b)等腰直角三角形排列的背光模组照度图

Fig. 5 Illuminance images of backlight module of (a) isosceles triangle and (b) isosceles right triangle arrangements

器通用规范》<sup>[16]</sup>和《数字电视平板显示器测量方法》<sup>[17]</sup>规定的要求。

将 Trace Pro 软件仿真过后的模组以普通 SAT 文件格式导入 LightTools 光学软件,设置好基本的参数和膜片属性。考虑到高动态范围背光模组对峰值亮度的要求,将光线仿真数量增加为 250 万条,利用 LightTools 软件设置 BEF 的微结构。在添加接收表面后设置背光模组的空间亮度计,同时定义亮度计的距离、方位与收光角锥,并利用 Properties 选项做细节的修改。背光模组的亮度仿真结果如图 6 所示。

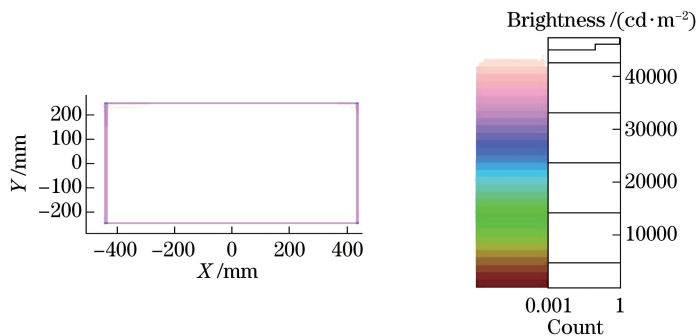


图 6 以等边三角形排列的高动态范围显示系统背光模组亮度图

Fig. 6 Luminance graph of backlight module of HDR display system with equilateral triangle arrangement

对等腰三角形排列和等腰直角三角形排列的亮度仿真实验,选用同样的膜片材料和结构,相同的光源功率和光线,相同的观察距离。不同的是,等腰三角形排列和等腰直角三角形排列采用照度仿真实验时的设计参数,仿真结果如图 7 所示。

比较图 6、图 7(a)、图 7(b),可以明显看出图 6 所表征的背光模组的亮度均匀性更高,其绝大部分亮度值分布都在  $45000 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  以上,比较结果详见表 2 所示。

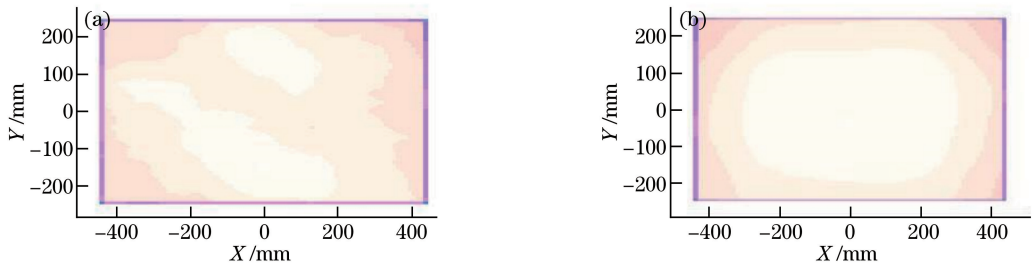


图7 以(a)等腰三角形、(b)等腰直角三角形排列的背光模组亮度图

Fig. 7 Luminance graphs of backlight module of (a) isosceles triangle and (b) isosceles right triangle arrangements

表2 不同排列方式亮度仿真结果对比

Table 2 Comparison of luminance simulation results of different arrangements

Arrangement mode	Min /( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Max /( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Standard deviation /( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Luminance uniformity /%
Isoceles triangle	42568	48432	1421	87.89
Regular triangle	45331	47293	980	95.85
Isoceles right triangle	44830	49756	1250	90.10

由表2可知,以等边三角形排列的背光模组设计参数在亮度仿真方面,相较于等腰三角形排列、等腰直角三角形排列具有更好的亮度均匀性和更小的标准偏差。为了更好地体现设计实现的背光模组在亮度均匀性方面的直观感受,利用 Matlab 软件将仿真实验数据转化为三维空间亮度网格,如图8所示。

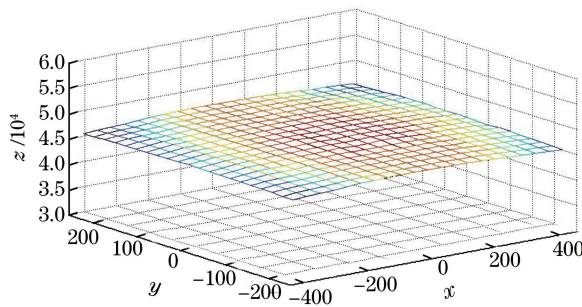


图8 背光模组空间亮度网格图

Fig. 8 Mesh graph of spatial brightness of backlight module

图8是将 LightTools 软件仿真结果经 Matlab 绘图得到的直观的空间亮度网格示意图。为了更细致地表现结果的均匀性,比图6、图8采用了更小的标尺刻度。实验结果表明:最大的网格空间亮度值为  $47293 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ,最小的亮度值  $45331 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ,平均亮度值为  $46682 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ,亮度均匀性为  $95.85\%$ 。背光模组光线按照  $6\% \sim 8\%$  的透射率<sup>[18]</sup> 投射到前屏, LCD 的亮度至少达到  $2500 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。按照 2016 年初在 CES2016 大会上,超高清联盟发布的 4K/HDR 认证标识,高动态范围显示器必须达到峰值亮度  $1000 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  以上的认证标识<sup>[19]</sup>。因此,该背光模组的设计达到了较为理想的亮度要求。

直下式背光模组位于 LCD 液晶面板的后面,是一套相对独立的系统。在经过高动态范围背光模组光学软件的仿真实验后,实验结果可为背光源印刷电路板(PCB)的绘图、布局以及背光结构的搭建提供理论依据,且不失其一般性。图9是以 LG 40 in 普通液晶显示器为平台,课题组独立设计实现的高动态背光板、LED 阵列逻辑控制板,加以原厂设计的液晶面板、液晶控制面板最终实现的高均匀度、高亮度的高动态范围视频显示系统[图9(b)]与光敏电阻(LDR)显示器[图9(a)]显示图像时的对比图。如图9(b)、图9(d)所示,设计实现的高动态范围显示系统呈现出更多可能的画面感受,在花瓣处有效提升了亮度,而在暗处表现得更为深邃且兼具更多的细节,同时色彩的拓展也让画面颜色具有明亮而纯粹的效果。从显示系统呈现出的画面效果看,理论分析和软件仿真实验提供的设计参数符合高动态范围显示系统的设计要求。

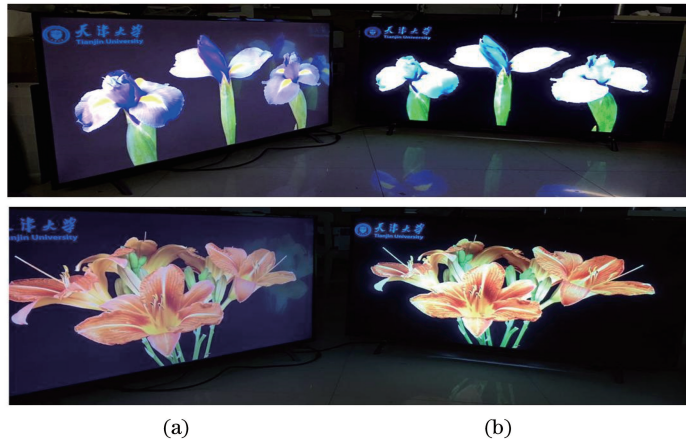


图9 (a) LDR显示器与(b)高动态范围视频显示系统显示效果对比图

Fig. 9 Comparison images of display effects between (a) LDR and (b) HDR video display system

## 4 结 论

利用斯派罗法则解决最大限度平坦条件的原理得到直下式背光模组 LED 间距、混光距离对照度均匀性的关系表达式,并利用光学设计软件 LightTools、TracePro 进行模拟仿真,以此为基础设计出高动态范围视频显示系统。结果表明,仿真实验设计的高动态范围背光模组能够达到当前高动态范围视频显示系统对高亮度、高均匀性的要求。相比于以往的高动态范围的背光设计,从几何光学角度设计与实现高动态范围背光模组,能够在理论上得到更多的支撑。在实践上运用光学仿真软件,可大大简化设计成本和研发周期,对推进高动态范围显示器的研究具有积极意义。

## 参 考 文 献

- [1] Huang Bingle, Guo Tailiang, Yao Jianmin, *et al.* Design of high dynamic range display[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2013, 28(6): 906-910.  
黄炳乐, 郭太良, 姚剑敏, 等. 一种高动态范围显示系统的设计[J]. 液晶与显示, 2013, 28(6): 906-910.
- [2] Ledda P, Chalmers A, Seetzen H. HDR displays: a validation against reality[C]. The Hague: 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2004: 2777-2782.
- [3] Burini N, Nadernejad E, Korhonen J, *et al.* Modeling power-constrained optimal backlight dimming for color displays [J]. Journal of Display Technology, 2013, 9(8): 656-665.
- [4] Duan Lüyin. Research on high dynamic range display systems[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.  
段绿茵. 高动态范围视频显示系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [5] Punekar G S, Suhas K, Yadav P S, *et al.* Uniform illumination over a square target-surface using LED arrangements [C]. IEEE International Conference on Industrial and Information Systems, 2012: 1-5.
- [6] Ali R E, Elgala H. Energy efficient LED layout optimization for near-uniform illumination[C]. SPIE, 2016, 9954: 995406.
- [7] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineeringoptics[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011.  
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [8] Qian Keyuan. Near field optical modeling of LED and design optimization for direct-type backlight optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0522001.  
钱可元. LED 近场光学模型与直下式背光透镜的设计优化[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0522001.
- [9] Wang Jiawen, Su Zhouping, Yuan Zhijun, *et al.* Study on uniformity of LED array illumination distribution on target plane[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(8): 0822004.  
王加文, 苏宙平, 袁志军, 等. LED 阵列模组化中的照度均匀性问题[J]. 光子学报, 2014, 43(8): 0822004.
- [10] Huang Qilu, Wu Fengtie. Investigation of uniform illumination of near-field targets using a conic light-emitting diode

- array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 3039-3043.
- 黄启禄, 吴逢铁. 基于近场均匀照明的 LED 二次曲线阵列的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 3039-3043.
- [11] Chen Xinrui, Han Jinghua, Li Hongru, *et al.* Optimal design of LED arrays for near-field uniform illumination[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 122-127.
- 陈新睿, 韩敬华, 李洪儒, 等. 基于近场均匀照明的 LED 阵列的优化设计[J]. *应用光学*, 2014, 35(1): 122-127.
- [12] Zhang Hang, Wu Mengying, Ma Yufei, *et al.* Symmetrical analysis of uniform illumination design for rectangular arrayed light emitting diode sources[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 102205.
- 张航, 吴梦莹, 马宇飞, 等. 矩形阵列 LED 均匀配光的对称性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 102205.
- [13] Hao Jian, Jing Lei, Wang Yao, *et al.* Design of uniform illumination for array LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1022003.
- 郝剑, 荆雷, 王尧, 等. 阵列型紫外 LED 匀光照明系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1022003.
- [14] Yang H, Bergmans J W M, Schenk T C W, *et al.* Uniform illumination rendering using an array of LEDs: a signal processing perspective[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(3): 1044-1057.
- [15] Wang Yao, Jing Lei, Dang Boshi, *et al.* Design of LED source with large aperture and small view angle used in the LCD detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1022002.
- 王尧, 荆雷, 党博石, 等. 用于液晶显示屏检测的大口径小角度 LED 光源设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1022002.
- [16] 数字电视接收设备功能和性能标准工作组. SJ/T 11343-2006 数字电视液晶显示器通用规范[S]. 中华人民共和国信息产业部, 2006.
- [17] 数字电视接收设备测试方法标准工作组. SJ/T 11348-2006 数字电视平板显示器测量方法[S]. 中华人民共和国信息产业部, 2006.
- [18] Huang Ziqiang. Principle of liquid crystal display[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.
- 黄子强. 液晶显示原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [19] François E, Bordes P, Léannec F L, *et al.* High dynamic range and wide color gamut video standardization—status and perspectives[J]. *High Dynamic Range Video*, 2016: 293-315.