

## 电视流光溢彩系统的沉浸式视觉体验研究

夏振平<sup>1,2\*</sup>, 林李兴<sup>2</sup>, 张跃渊<sup>1</sup>, 黄涛<sup>1</sup>, 胡伏原<sup>1</sup><sup>1</sup>苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009;<sup>2</sup>苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215009

**摘要** 为了更为深入地研究各种因素对流光溢彩感知效果的影响,构建了一套基于LED光分布模型的流光溢彩光效模拟系统。测试对比结果表明,模拟系统可以准确地模拟真实流光溢彩的光分布和色彩融合效果。基于该模拟系统设计和完成了一系列视觉感知实验,以研究各因素对流光溢彩系统光效感知的影响。视觉感知实验结果表明,LED光强大小及其分布范围相关影响因素对流光溢彩整体光效的视觉体验具有显著性( $p < 0.01$ )影响,而其他因素包括LED层数、LED分组方法及相关显示内容选择宽度对流光溢彩光效感知并无显著( $p > 0.05$ )影响。所提出的模拟系统及初步研究结果可以为实际电视流光溢彩系统的设计和生产提供理论参考。

**关键词** 视觉光学; 流光溢彩; 模拟系统; LED光分布; 沉浸式观看体验

中图分类号 TN27 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2133001

## Immersive Visual Experience of TV Ambilight System

Xia Zhenping<sup>1,2\*</sup>, Lin Lixing<sup>2</sup>, Zhang Yueyuan<sup>1</sup>, Huang Tao<sup>1</sup>, Hu Fuyuan<sup>1</sup><sup>1</sup>College of Electronics and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China;<sup>2</sup>College of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China

**Abstract** To investigate the factors affecting the visual experience with the TV Ambilight system more deeply, this paper establishes a TV Ambilight simulation system based on the LED light distribution model. The measurement and comparison results show that the simulation system can simulate the light distribution and color fusion of real Ambilight accurately. Experiments designed and accomplished by the simulation system are employed to investigate the factors affecting the perception of Ambilight light effects. The visual perception experimental results indicate that the related factors of LED light intensity and distribution range exert a significant ( $p < 0.01$ ) effect on the visual experience of Ambilight effects. However, other factors including the number of LED layers, LED grouping methods, and selected content width have little impact ( $p > 0.05$ ). The proposed simulation model and preliminary research results can provide a theoretical reference for the design and manufacture of real TV Ambilight systems.

**Key words** visual optics; Ambilight; simulation system; LED light distribution; immersive visual experience

## 1 引言

近年来,以电视为代表的显示技术发展迅速<sup>[1]</sup>。技术的进步也提升了消费者的认知水平,人们开始从单纯对显示系统图像质量的追求,逐步转变到更高层次的对显示系统整体视觉体验的渴求。观看的真实感、临场感以及视觉舒适度等成为显示系统性能表现的重要指标<sup>[2]</sup>。飞利浦(Philips)首创电视流光溢彩

(Ambilight)系统<sup>[3]</sup>结合立体显示技术<sup>[4]</sup>,通过环境氛围的营造和立体感知效果的构建,给观众带来了更加优越的沉浸式电视观看体验。

显示系统图像质量与环境光通常被认为是对立的存在,环境光往往会降低包括对比度、色彩呈现等图像质量评价指标<sup>[5]</sup>。然而,没有环境光的显示系统使用场景又会使观众的视觉舒适度降低<sup>[6]</sup>,容易产生视疲劳,长期使用甚至会造成视力损伤。环境光对视觉以

收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-04-16; 录用日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(62002254, 61876121)、江苏省自然科学基金(BK20200988)

通信作者: \*xzp@usts.edu.cn

及非视觉健康的影响也越来越受到人们的重视<sup>[7-8]</sup>。流光溢彩系统的提出很好地解决了这一矛盾,其将环境光融入了显示系统。LED 凭借其效率高、使用寿命长、环境友好、色彩饱和度高等优点被广泛应用于通用和特殊照明系统<sup>[9-12]</sup>。彩色 LED 照明系统具有较高的色彩饱和度,同时调节十分便利,在光环境氛围营造中极具优势。Ambilight 系统是在电视背面近边框处安装 LED 照明灯带,灯光通过白色电视背景墙漫反射,营造出“光随像动”的电视使用环境光氛围。Ambilight 一词就是环境(Ambient)与光(Light)的合成词。Ambilight 技术的发展已经经历了 4 代的更新(图 1),经历了从单色[图 1(a)]到多色彩融合,从仅左右两边光效到四周光效的发展历程。

流光溢彩系统的照明光依据显示的图像内容生成,突破了显示屏幕的边界局限性,在沉浸式视觉体验和视觉舒适度方面均有优越的表现。Bullough 等<sup>[13]</sup>研究了观看电视过程中电视周围的环境光对视疲劳的影响。主观描述和眨眼频率数据结果表明电视周围的环境光对视疲劳有缓解作用。Seuntiens 等<sup>[14]</sup>通过视觉感知实验研究了图像质量、立体感、流光溢彩对观看的真实感、观看体验以及临场感的影响。实验结果表明流光溢彩营造的光环境以及立体显示带来的立体感均提升了观看的视觉体验。Weffers-Albu 等<sup>[3]</sup>通过观看电影过程中是否使用流光溢彩系统的对比实验,借助

主观调查问卷和客观生理数据测量的方法研究了流光溢彩对沉浸式观影体验的影响。主观调查问卷数据以及客观的呼吸频率数据统计分析结果表明,流光溢彩系统的启用显著提升了沉浸式体验的水平。de Meulenaere 等<sup>[15]</sup>研究了受测者特性及环境光特性(流光溢彩)对立体电视观看沉浸感和舒适度的影响。光环境(流光溢彩)显著提升了立体电视观看的临场感和舒适度。多个基于视觉感知实验的研究明确了流光溢彩系统对于电视观看效果的积极作用,但是缺乏更为深入的不同流光溢彩设计之间的比较研究,以指导流光溢彩系统的优化<sup>[2]</sup>。

基于几种可能的流光溢彩轮廓模型,结合不同的参数设置,会产生不同的沉浸式电视观看体验。尽可能真实地模拟流光溢彩系统的光效,而不是直接构建原型,有助于以相对较低的成本快速描述电视流光溢彩的观看体验。鉴于流光溢彩系统优化的便利性和经济性需求,建立一个能够模拟真实流光溢彩系统光效的仿真模型至关重要。流光溢彩光效由 LED 阵列产生,模拟流光溢彩的最佳方法是基于 LED 阵列的亮度分布模型<sup>[16]</sup>,该方法综合考虑光分布<sup>[17]</sup>和色彩融合重现<sup>[18]</sup>的效果。本文提出了一种基于 LED 亮度分布的流光溢彩系统光效仿真模型,在此基础上通过系统的视觉感知实验,研究了多种参数设置对观看体验的影响。

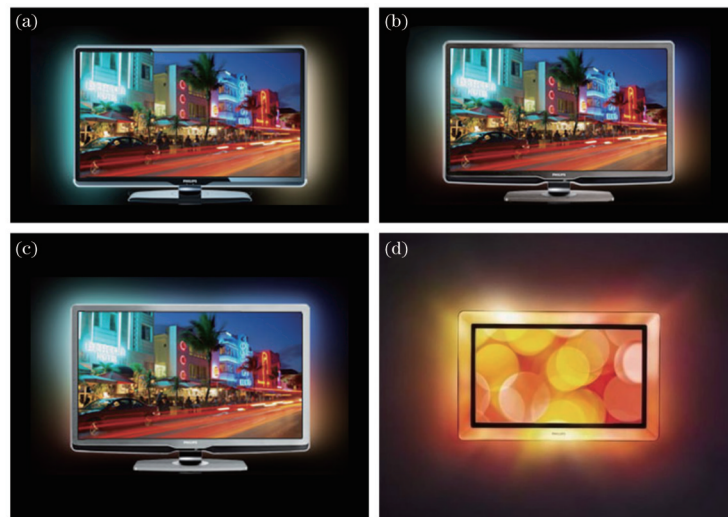


图 1 飞利浦电视流光溢彩技术。(a) Spectrum 1; (b) Spectrum 2; (c) Spectrum 3; (d) Aurea

Fig. 1 Ambilight technology of Philips TV. (a) Spectrum 1; (b) Spectrum 2; (c) Spectrum 3; (d) Aurea

## 2 流光溢彩系统光效模拟

为了更为准确地评估电视流光溢彩系统的视觉体验,建立了带有包括沙发在内的简单家具的模拟客厅场景(图 2)。正对沙发的位置放置着没有配备流光溢彩系统的普通电视,电视背后的整面背景墙是投影屏幕。投影屏幕后方空间,利用投影仪将模拟的流光溢彩光效以图像的形式投影到投影屏幕上。投影屏幕形成完全隔断的墙体,观众(受测者)观看电视时处于独

立的模拟客厅空间。投影仪与电视同步工作,显示匹配的内容。

### 2.1 单 LED 光分布模型

真实光源的三个基本抽象属性是几何形状、亮度属性以及表征光源模型的强度分布<sup>[19]</sup>。几何形状是指光源的大小和形态。流光溢彩系统中所使用的全彩 LED 和漫反射背景墙体之间的距离远大于 LED 直径的 5 倍,因此这里的 LED 可以理想化为点光源模型。在这种情况下,可以根据“五倍法则”<sup>[20]</sup>应用距离衰减

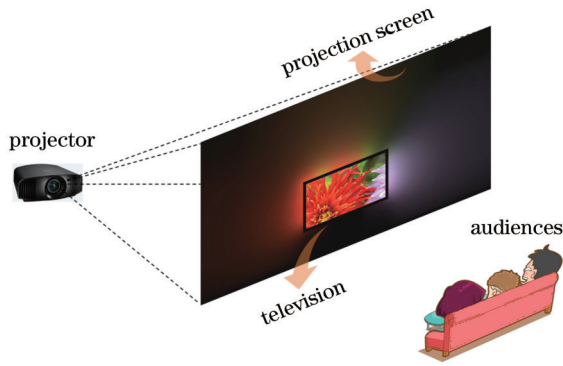


图 2 电视流光溢彩沉浸式视觉体验模拟系统

Fig. 2 Immersive visual experience simulation system of TV Ambilight

和平方反比定律。平方反比定律可表示为

$$a = \frac{1}{d^2}, \quad (1)$$

式中： $a$ 为光亮度衰减因子； $d$ 为光源到被照射表面的距离。

实际中不能将 LED 光源视为具有平行光线的准直光源。LED 的光从发射表面射出，然后通过反射杯

和封装透镜进行重定向。因此，来自 LED 的光是发散的，可以构建一个简单的角衰减模型表达光的角扩散效应[图 3(a)]。角衰减模型中的扩散因子为

$$f = \left[ \frac{\cos \alpha - \cos(\varphi/2)}{1 - \cos(\varphi/2)} \right]^\rho, \quad (2)$$

式中： $f$ 为光强度的角衰减因子； $\alpha$ 为光源照射方向矢量  $D$ (从 LED 光源到点  $Q$ )和光源到被照射点( $P$ )矢量  $L$ 之间的夹角； $\varphi$ 为照明圆锥体的角度； $\rho$ 为角度光强度衰减曲线形状参数。

假设 LED 光源的发光强度为  $I$ ，则被照射点  $P$  的光强度计算需考虑距离衰减和角衰减。任意被照射点  $P$  的光强度为

$$I_p = I \times \left[ \frac{\cos \alpha - \cos(\varphi/2)}{1 - \cos(\varphi/2)} \right]^\rho / d^2. \quad (3)$$

基于 LED 垂直照射的模型，不同的辐射方向由水平偏差角  $\beta$  和垂直偏差角  $\psi$  定义[图 3(b)]。尽管单 LED 光分布模型为投影在二维平面上的光分布，但此模型具有距离和方向参数，实际上在三维空间任意平面可以表述光分布的三维模型。

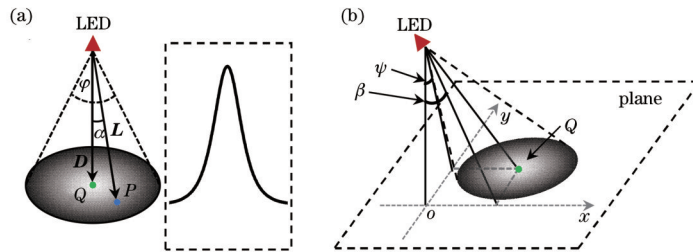


图 3 单 LED 发光强度分布模型。(a) LED 角衰减模型；(b) LED 辐照方向的定义

Fig. 3 Models of LED luminance intensity distribution. (a) Angular decay model of LED; (b) definition of irradiation direction of LED

### 2.2 LED 阵列的光效模拟

流光溢彩的整体效果由所有 LED 的光分布叠加而成。单个 LED 光分布模型应用到流光溢彩系统模拟中，可以构建 LED 阵列光叠加的整体融合效果。完整的模型将所有 LED 分为 8 类：4 个侧面(左、右、上、

下)和 4 个角(左上、右上、左下、右下)。通过设置各类 LED 开启和关闭的状态，实现模型不同型号流光溢彩(图 1)的功能。图 4(a)~(c)展示了模拟的三种流光溢彩模式，即两边模式、三边模式、四周模式。

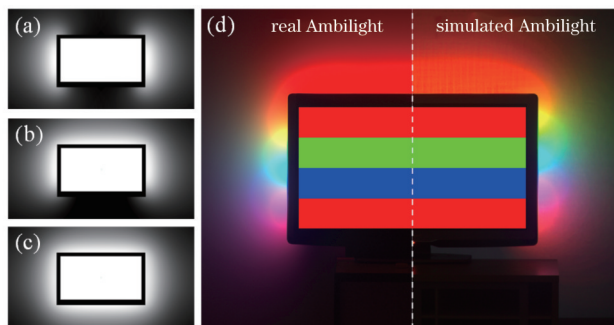


图 4 流光溢彩系统光效模拟。(a)两边模式；(b)三边模式；(c)四周模式；(d)彩色混光模式下色彩融合的真实与仿真效果比较

Fig. 4 Light distribution simulation of Ambilight system. (a) Two side mode; (b) three side mode; (c) four side mode; (d) color fusion comparison between real and simulated Ambilights under color mixed light mode

在完整的流光溢彩模拟系统中,4个侧面的多个LED分布模拟具有相同的参数设置。这些LED设置为相同的照射方向和相同的最大发光强度。为了灵活调整模型中可能涉及的多种光效影响因素,在模型构建时考虑了参数调整的便利性。每侧的LED数量、LED位置(包括LED到被照射背景墙的距离和电视背框上LED的位置)、最大发光强度,以及每个LED的照射方向、LED分组模式都是可变参数。最终,流光溢彩模拟光效图像在投影屏幕上显示之前,还需要测试所用投影仪的伽马特性,并根据该特性进行伽马校正。

直观上,不同多边模式的光分布达到了预期效果[图4(a)~(c)]。色彩融合效果方面,图4(d)展示了真实流光溢彩(左侧)与模拟光效(右侧)的直接比较结果。电视屏幕从上到下显示红、绿、蓝、红相间的条形图像,流光溢彩系统LED的发光强度和颜色依据显示内容生成。真实的流光溢彩光分布效果是由一台带有流光溢彩 Spectrum 3(三边模式)的46 inch(1 inch=2.54 cm)飞利浦流光溢彩电视(46PFL9704H)放置在白色背景墙前产生。模拟的流光溢彩光分布效果是在模拟的客厅场景(图1)中实现,使用同样尺寸的不具备流光溢彩功能的电视,流光溢彩效果由模拟的背景墙(投影屏幕)呈现。图4(d)是在暗室环境中测试(拍

摄)得到,效果对比验证所采用的测试设备是 Radiant Pro-Metric 相机(PM-1200 成像色度计),它可以测量光的强度分布和色度。为了精确测量流光溢彩光分布轮廓,实际测量时使用了一张黑纸覆盖电视屏幕,避免其过高的亮度影响流光溢彩光效的测量。考虑到流光溢彩的对称性,仅测量了右半部分。图4(d)为将真实流光溢彩效果进行镜像后与模拟流光溢彩效果进行拼接得到的完整的电视流光溢彩光效。对比可见,直观上模拟出的混色与真实混色的感知效果一样流畅、生动。

除了较直观地比较不同多边模式的光分布效果及色彩融合效果以外,测试还通过光分布曲线的直接对比验证了模拟系统的仿真性能。在电视显示纯白画面的情况下,同时测量了真实和模拟的流光溢彩光分布(图5),并对上侧区域、右侧区域、对角区域进行选择采样,图5(b)~(d)呈现了光强度随着距离电视边框远近变化的变化趋势。光分布的测试过程也是不断优化过程,通过一系列可控LED光分布模型中参数的调优,最终尽可能真实地再现了该型号电视流光溢彩系统的光效。最终调优后的测试结果表明,所构建的流光溢彩模拟系统的模拟效果与真实流光溢彩光效具有较好的一致性。

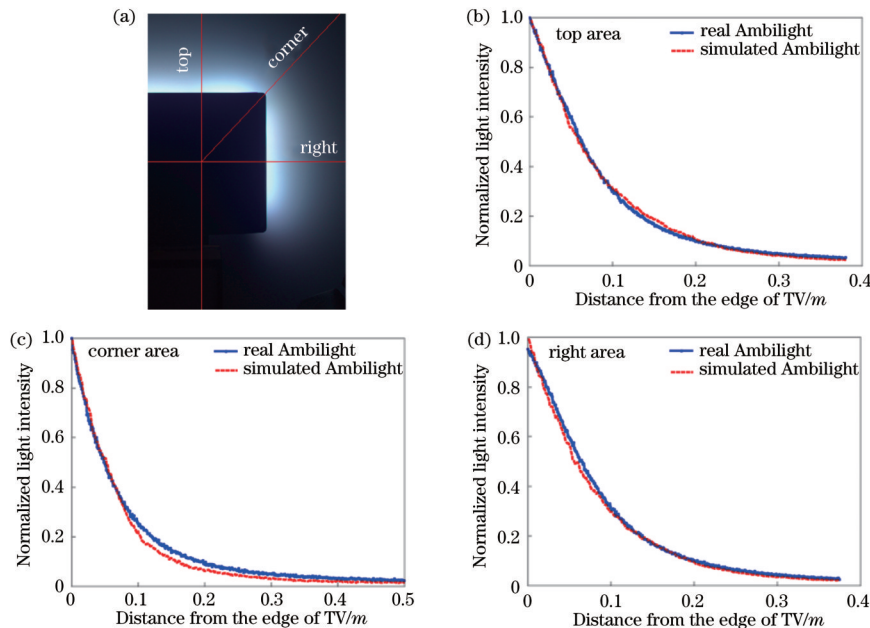


图5 LED阵列融合光效的实际与仿真效果比较。(a)光融合效果的比较位置;(b)上侧光分布比较;(c)对角光分布比较;(d)右侧光分布比较

Fig. 5 LED array light fusion comparison between real and simulated Ambilight. (a) Locations of compared fused light distributions; (b) light distribution comparison of top area; (c) light distribution comparison of corner area; (d) light distribution comparison of right area

### 3 流光溢彩系统视觉感知实验

#### 3.1 系统模型

电视流光溢彩系统产生的环境光是依据电视显示画面内容生成的。以三边模式的流光溢彩为例,具体流程如图6所示。选择画面边缘的带状内容,剪切后经过提取处理,对应生成每个LED的发光颜色及强

度。最终基于LED阵列光效模拟模型生成用于同步投影的流光溢彩模拟光效。

影响电视流光溢彩效果的因素非常多,依据当前系统设计人员感兴趣的几个方面,设计了包含LED层数、LED分组方案、相关显示内容选择宽度、LED投射角度、LED排布弯曲方法的使用、上侧与左右两侧LED光强比例这6个参数作为研究对象。因交叉研究

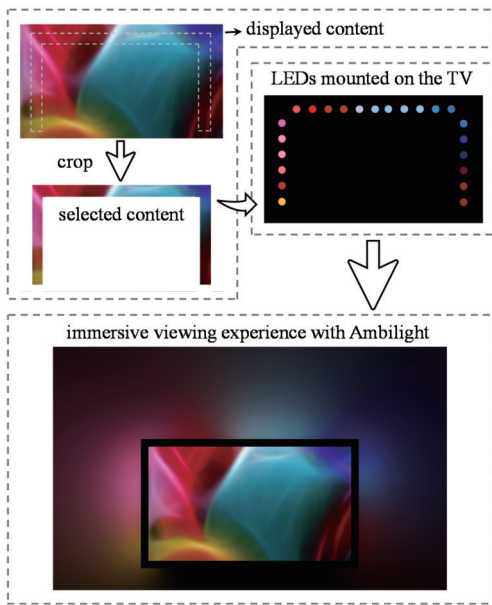


图 6 电视流光溢彩系统的环境光模拟流程

Fig. 6 Ambient light simulation process of TV Ambilight system

所有因素涉及的实验量超出合理范围,研究时针对特定单个影响因素,设计了有限的相关因素。表 1 列出了所有影响因素的可选参数,以及单个因素研究时可能有交叉影响的相关因素选择。LED 层数可以是 1 层或者 2 层,默认值为 1 层。这里的两层 LED 意味着模型中从显示屏上相关内容的选择到 LED 发光模拟的过程,构建了 2 组 LED 发光模型,将这 2 组光效融合到一起构成整体效果。研究 LED 层数时,选择的相关影响因素是相关显示内容选择宽度和 LED 投射角度。根据模拟的真实流光溢彩系统,左、上、右侧的 LED 数分别为 13、26 和 13。LED 分组方案有 3 种,即方案 2\_2\_2、方案 4\_6\_4 和方案 13\_26\_13。默认方案为 13\_26\_13。方案 2\_2\_2 代表 3 侧 LED 均分为 2 组,左右两侧偏上 6 颗 LED 为 1 组、偏下 7 颗 LED 为 1 组,上侧 LED

平均分为 2 组,每组 13 颗;方案 4\_6\_4 中,左右两侧最下 1 组为 4 颗 LED、其余为 3 颗,上侧两端为 5 颗 LED 为 1 组、中间 4 颗为 1 组;13\_26\_13 方案中,每颗 LED 独立控制。以上多个 LED 为 1 组时,同 1 组 LED 的发光强度和颜色保持一致。研究 LED 分组方案时,选择的相关影响因素是 LED 层数和相关显示内容选择宽度。相关显示内容选择宽度基于全高清的显示内容 (1920 pixel×1080 pixel),以像素宽度定义。方案 64/128\_128 在 LED 层数为 1 层时宽度为 64 pixel,LED 层数为 2 层时宽度均为 128 pixel;方案 224/224\_64 在 LED 层数为 1 层时的宽度为 224 pixel,LED 层数为 2 层时的宽度分别为 224 pixel 和 64 pixel。默认方案选择宽度更宽的 224/224\_64 方案。研究相关显示内容选择宽度时,选择的相关影响因素是 LED 分组方案和 LED 层数。LED 投射角度定义为在垂直照射的基础上向电视边框外侧偏离的角度,共有三种选择:20°、40°和 60°,默认值为 20°。研究 LED 投射角度时,选择的相关影响因素是 LED 排布弯曲方法的使用和上侧与左右两侧 LED 光强比例。LED 排布弯曲方法的使用是为了使对角区域的光融合更加自然,采用弯曲对角附近 LED 排布位置的方法,选择开启或关闭,默认为开启。研究 LED 排布弯曲方法的使用时,选择的相关影响因素是 LED 投射角度和上侧与左右两侧 LED 光强比例。因上侧 LED 数量占有绝对优势,综合亮度要高于两侧的光亮度,上侧与左右两侧 LED 光强比例设置是为了研究光强度平衡的偏好。固定左右两侧的 LED 光强度不变,上侧 LED 最高亮度与两侧亮度之比为 0.4、0.7 或 1.0。研究上侧与左右两侧 LED 光强比例时,选择的相关影响因素是 LED 投射角度。考虑到图像内容本身也会对感知效果产生直接的影响,实验选择了不同类型的 6 幅图像(图 7),以上每个流光溢彩模拟效果均在这些图像上应用,作为视觉感知实验的样本。

### 3.2 实验设置

主观实验在无其他光源的模拟客厅进行,实验电

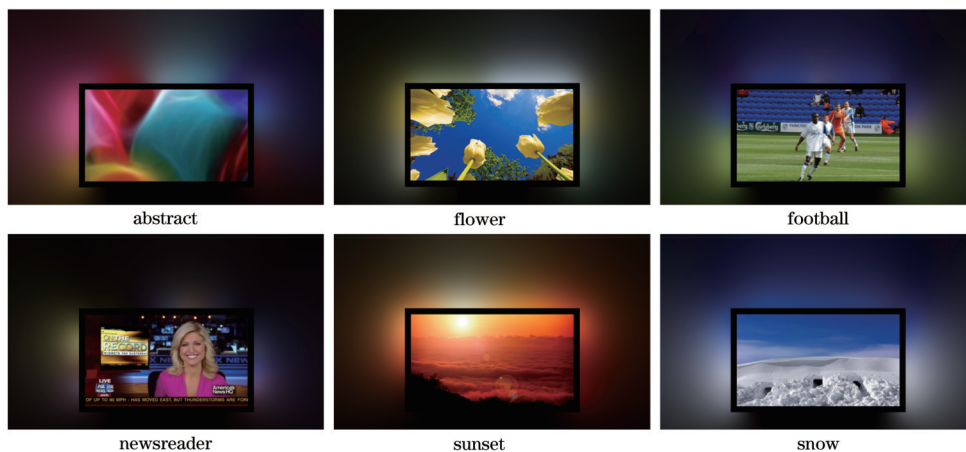


图 7 视觉感知实验使用的多种类型图像及其对应的环境光效果(环境光效果为三边模式)

Fig. 7 Various types of images and according simulated Ambilight used for perception experiment (light distribution mode is three side mode)

表 1 电视流光溢彩系统沉浸式视觉体验影响因素的设计

Table 1 Investigated factors affecting immersive visual experience of TV Ambilight system

Investigated factor	Value option	Default	Concerned factor	Stimuli No.	Choice No.
Number of layers	1: one layer;	1	Selected content width, LED projection angle	12	4
	2: double layers				
LED group style	1: 2_2_2;	3	Number of layers, selected content width	12	6
	2: 4_6_4;				
	3: 13_26_13				
Selected content width	1: 64/128_128;	2	LED group style, number of layers	12	6
	2: 224/224_64				
LED projection angle	1: 20°;	1	Bend method, intensity ratio	18	6
	2: 40°;				
	3: 60°				
Bend method	1: on;	1	LED projection angle, intensity ratio	18	9
	2: off				
Intensity ratio	1: 0.4;	3	LED projection angle	9	3
	2: 0.7;				
	3: 1.0				

视为 42 inch 飞利浦液晶电视(42PFL9803),模拟流光溢彩的投影系统是 SANYO 投影仪(PLV\_80L)。受测者自然坐在沙发上,沙发到电视平面的直线距离为 3 m。实验采用偏好选择的方法,同一组被选择的样本随机显示,受测者通过键盘控制键从中选择最喜欢的。表 1 中列举了各组实验生成的样本数及受测者需要做出的选择数。6 幅图像内容对应 6 倍的样本及选择量,每个受测者共进行了 204 次选择,分 2 次完成。

20 名受测者完成了全部视觉感知实验的测试,受测者中包含 5 名女性,平均年龄为 30.40 岁,标准偏差为 10.75 岁,年龄范围在 21~55 岁。所有受测者均经过视力测试及石原氏(Ishihara Test)色盲测试,受测者视力均为正常或矫正至正常,同时无色盲情况。

#### 4 视觉感知实验结果分析

采用 SPSS 软件(IBM SPSS Statistics 26.0)对视觉感知实验结果进行分析,各影响因素对流光溢彩感知偏好影响的方差分析(ANOVA)结果如表 2 所示。LED 层数、LED 分组方案、相关显示内容选择宽度对流光溢彩感知偏好均无显著性( $p>0.05$ )影响。LED 投射角度、LED 排布弯曲方法的使用、上侧与左右两侧 LED 光强比例对流光溢彩感知偏好均有高度显著( $p<0.01$ )的影响。

为了进一步分析各因素对流光溢彩感知偏好的影响趋势,图 8 分别列出了视觉感知实验的平均结果及其标准误差。不同 LED 层数的评价结果几乎无差异[图 8(a)],表明多层的 LED 设计增加成本的同时并没有体现出相应的价值。LED 分组方案的评价结果[图 8(b)]表明即使无显著性影响,LED 分辨率的提高也对感知效果有积极作用。相关显示内容选择宽度更宽,视觉感知实验的评价平均值更高[图 8(c)],但无显著性的提高。LED 投射角度对主观感知效果有显

表 2 各影响因素对沉浸式流光溢彩系统感知偏好的 ANOVA 分析结果

Table 2 Results of ANOVA analysis of factors affecting perceptual preference of immersive Ambilight system

Influence factor	Perceptual preference		
	$d_f$	$F$	Sig.
Number of layers	1	0	1.000
LED group style	2	0.989	0.377
Selected content width	1	0.075	0.786
LED projection angle	2	16.746	0
Bend method	1	627.607	0
Intensity ratio	2	19.045	0

Notes:  $d_f$  represents degree of freedom;  $F$  represents a ratio of the between-group variation divided by the within-group variation; Sig. represents significant level.

著性影响,投射角度过大(60°)时评分急剧降低[图 8(d)]。图 8(e)表明 LED 排布弯曲方法的使用达到了使对角区域的光融合更加自然的目的。对于光强度平衡的喜好,实验结果[图 8(f)]表明观众对平衡并无要求,反而更趋向于上侧综合光强更强的方案。

#### 5 结 论

电视流光溢彩系统将环境光与显示技术融为一体,通过环境光氛围的营造,提升观看的真实感、临场感,达到沉浸式观看体验的目的。为了更为深入地研究各种因素对流光溢彩效果的影响,构建了一套基于 LED 光分布模型的流光溢彩光效模拟系统。基于该系统设计完成了一系列视觉感知实验,结果表明 LED 光强大小及其分布对流光溢彩整体光效具有显著性影响,而其他因素包括 LED 层数、LED 分组方法及相关显示内容选择宽度对流光溢彩光效体验并无显著影

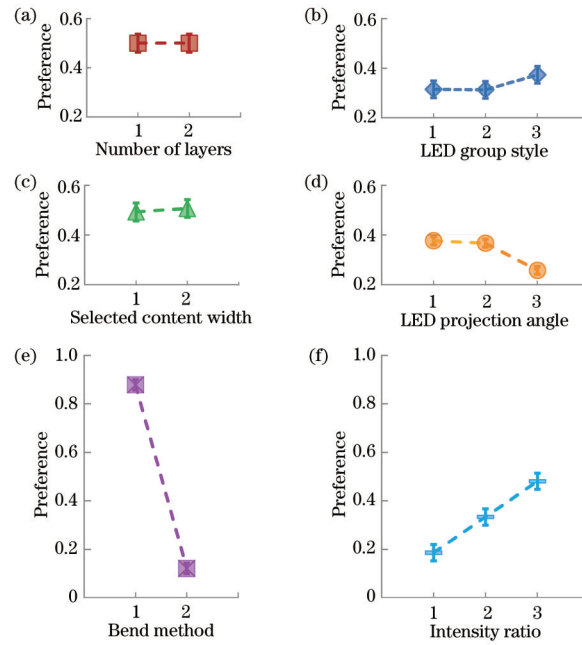


图 8 电视流光溢彩系统的光效偏好评价平均值及其标准误差。(a) LED 层数的偏好评价;(b) LED 组合方式的偏好评价;(c) 相关显示内容选择宽度的偏好评价;(d) LED 投射角度的偏好评价;(e) LED 排布弯曲方法的使用偏好评价;(f) 上侧与左右两侧 LED 光强比例设置偏好评价

Fig. 8 Average and standard deviation of preference evaluation of simulated TV Ambilight effect. (a) Preference evaluation of layer number; (b) preference evaluation of LED combination style; (c) preference evaluation of selected width of related display content; (d) preference evaluation of LED projection angle; (e) preference evaluation of bend method of LED arrangement; (f) preference evaluation of intensity ratio of top side to left and right sides

响。基于该流光溢彩模拟系统的动态流光溢彩视觉感知效果优化以及视听一体感知也是未来的研究方向。

#### 参 考 文 献

- [1] 杨鑫, 焦述铭, 宋强, 等. 计算机制相位彩虹全息近眼显示[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2209001.  
Yang X, Jiao S M, Song Q, et al. Computer generated phase-only rainbow holographic near-eye display[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2209001.
- [2] Heynderickx I, de Ridder H. From image quality to atmosphere experience: how evolutions in technology impact experience assessment[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8651: 86510I.
- [3] Weffers-Albu A, de Waele S, Hoogenstraaten W, et al. Immersive TV viewing with advanced Ambilight[C]// 2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics, January 9-12, 2011, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2011: 753-754.
- [4] 石肖, 艾灵玉, 于森, 等. 基于光场相机的全视差三维显示[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0711005.  
Shi X, Ai L Y, Yu M, et al. Full-parallax three dimensional display based on light field camera[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0711005.
- [5] Shahidan M F S, Song J C, James T D, et al. Vivid plasmonic color under ambient light[J]. Optics Express, 2021, 29(25): 40710-40720.
- [6] 陈燕燕, 王莉莉, 杨兰兰. 不同照明环境下 2D/3D 显示视疲劳研究[J]. 电子器件, 2016, 39(2): 242-247.  
Chen Y Y, Wang L L, Yang L L. Investigation of visual fatigue caused by 2D/3D display under different illuminations[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2016, 39(2): 242-247.
- [7] 周晓明, 罗达, 张惠平. 不同调光方式 LED 照射下的人体非视觉效应[J]. 发光学报, 2016, 37(7): 892-898.  
Zhou X M, Luo D, Zhang H P. Human non-visual effects under LED light with different dimming methods [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(7): 892-898.
- [8] 郑莉莉, 郭自泉, 严威, 等. 三基色白光 LED 的司辰节律因子研究[J]. 发光学报, 2016, 37(11): 1384-1389.  
Zheng L L, Guo Z Q, Yan W, et al. Investigation on the circadian action factor of RGB white LEDs[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(11): 1384-1389.
- [9] 马瑞青, 廖宁放. RGB-LED 光源下光源色度对颜色恒常性的影响[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0933001.  
Ma R Q, Liao N F. Influence of illuminant chromaticity on color constancy under RGB-LED light source[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0933001.
- [10] Wendt M, Andriess J W. LEDs in real lighting applications: from niche markets to general lighting[C]// Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, October 8-12, 2006, Tampa, FL, USA. New York: IEEE Press, 2006: 2601-2603.
- [11] 郭春丽, 黄敏, 习永惠, 等. LED 原色光谱对颜色匹配精度的影响分析[J]. 光学学报, 2020, 40(16): 1633001.  
Guo C L, Huang M, Xi Y H, et al. Influence of LED

- primary colors on color matching accuracy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1633001.
- [12] 朱民, 楼俊, 潘玉珏, 等. 基于新型 LED 准直系统的自由曲面均匀照明设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0422002.  
Zhu M, Lou J, Pan Y J, et al. Design of freeform surface with uniform illumination based on new LED collimation system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0422002.
- [13] Bullough J D, Akashi Y, Fay C R, et al. Impact of surrounding illumination on visual fatigue and eyestrain while viewing television[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2006, 6(8): 1664-1670.
- [14] Seuntjens P, Vogels I, VanKeersop A. Visual experience of 3D-TV with pixelated Ambilight[EB/OL]. [2022-03-08]. <https://www.docin.com/p-1598033673.html>.
- [15] de Meulenaere J, Willaert K, van den Broeck W, et al. Immersive experiences in the home: a field trial on stereoscopic 3DTV[C]//ImmersiveMedia'13: Proceedings of the 2013 ACM International Workshop on Immersive Media Experiences, October 22, 2013, Barcelona, Spain. New York: ACM Press, 2013: 1-6.
- [16] Bruyneel F, Lanoye L. Optical simulations for ambilight TV systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8429: 84290B.
- [17] Meuret Y, Lanoye L, Bruyneel F, et al. Improving the color uniformity of a LED-array based illumination system with a tailored light distribution[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7423: 74230N.
- [18] Salters B A, Krijn M P C M. Color reproduction for LED-based general lighting[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6338: 63380F.
- [19] Jongewaard M. Guide to selecting the appropriate type of light source model[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4775: 86-98.
- [20] Taylor A E F. *Illumination fundamentals*[M]. New York: Rensselaer Polytechnic Institute, 2000.