

文章编号:1007-2780(2017)12-1006-07

环境光对固态体积式真三维显示闪烁的影响研究

杨良勇¹, 王 阳^{2,3,4}, 金 韬^{2,3,4}, 石珩臻^{2,3,4}, 康吴伟^{2,3,4}, 方 勇^{2,3*}

(1. 安徽华东光电技术研究所 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, 安徽 芜湖 241000;

2. 合肥工业大学 特种显示技术教育部重点实验室 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, 安徽 合肥 230009;

3. 合肥工业大学 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;

4. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为了优化固态体积式真三维显示中的闪烁现象,研究了环境光对于显示闪烁的影响。通过傅里叶变换在频域获得环境光与成像光信号叠加后的频域能量分布,分析了环境光影响显示闪烁的原因。同时,设计完成了两组视觉感知实验并进行统计分析。结果显示,环境光的频率、最大光强及占空比对于真三维显示的闪烁程度有显著性影响,显著性差异小于 0.001。其中,环境光的频率是影响显示闪烁的首要因素,环境光频率与显示刷新率相匹配是消除环境光对闪烁影响的主要途径;降低最大光强或提高占空比有助于消除闪烁。闪烁程度评价模型的评估结果与实验结果的相关系数大于 0.99,研究结果对于基于层叠屏的三维显示闪烁程度优化具有积极的启发和指导作用。

关键词: 固态体积式真三维; 环境光; 闪烁; 视觉感知

中图分类号: TN27; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173212.1006

Impact of ambient light on flicker in solid-state 3D volumetric display

YANG Liang-yong¹, WANG Yang^{2,3,4}, JIN Tao^{2,3,4},
SHI Heng-zhen^{2,3,4}, KANG Wu-wei^{2,3,4}, FANG Yong^{2,3*}

(1. *National Engineering Laboratory of Special Display Technology,*

National Key Laboratory of Advanced Display Technology,

Anhui Hua Dong Photoelectric Technology Institute, Wuhu 241000, China;

2. *Key Laboratory of Special Display Technology of the Ministry of Education,*

National Engineering Laboratory of Special Display Technology,

National Key Laboratory of Advanced Display Technology,

Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3. *Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;*

收稿日期: 2017-07-11; **修订日期:** 2017-10-24.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(No.2012AA011901); 安徽省科技重大专项(No.16030901027)

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (No. 2012AA011901); Anhui Province Science and Technology Major Project(No.16030901027)

* 通信联系人, E-mail: fy9903@hfut.edu.cn

4. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To optimize the flicker visibility in solid-state 3D volumetric display, the impact of ambient light on flicker in solid-state 3D volumetric display is studied. The frequency domain energy distribution of superposition of ambient light and imaging light in the frequency domain is obtained through Fourier transformation, and the possible causes of ambient light affecting display flicker are analyzed. Meanwhile, two visual perception experiments were designed and implemented, and the experimental data are statistically analyzed. The research result shows that the frequency, maximum intensity and duty cycle of the ambient light have significant influence on the flicker of the 3D volumetric display, and the significant difference is less than 0.001. Among all the factors involved, the frequency of ambient light is the primary factor affecting the flicker, and the matching of the ambient light frequency with the display refresh rate is the main way to eliminate the flicker; reducing the maximum light intensity or increasing the duty cycle can help to eliminate flicker. The correlation coefficient between the estimation result of the flicker degree evaluation model and the experiment result is greater than 0.99. The research results have positive implications and guidance for the optimization of 3D display flicker intensity based on cascading screen.

Key words: solid-state volumetric 3D display; ambient light; flicker; visual perception

1 引言

2009年以来,以《阿凡达》为代表的3D电影展现出了强劲的增长势头,各种三维显示技术已进入高速发展时期,成为显示领域的研究热点^[1-2]。不同的三维显示方式在带来令人惊叹的立体效果的同时,也存在着如视觉疲劳、闪烁感等各种问题,因此对于三维显示的显示质量和观看舒适度的改善与提高也引起越来越多研究学者的关注^[3-4]。体三维显示是将物体映射到具有宽度、高度和深度的真实三维物理空间,通过激发空间中与三维物体相对应位置的显示介质发光而实现成像的一种新兴的三维显示方式,因具有真实的物理体积和深度,又被称为真三维显示。

固态体积式真三维显示是基于多层无源阵列的一种静态体三维显示,通过在空间中高速成像一系列二维切片图像序列,利用观看者的视觉暂留效应产生稳定的三维立体图像^[5]。固态体积式真三维的显示体由多层液晶光阀组成,显示体刷新率相比于传统二维显示明显偏低,因此易产生闪烁问题。此外,外界的环境光与成像光信号叠加后,可能会进一步加剧闪烁程度。相关研究表明,闪烁现象降低了显示质量和观看舒适度,甚至可能会对观看者的健康造成影响^[6-8]。目前,对于

显示闪烁的研究多集中于传统二维显示,三维显示中的闪烁问题,尤其是与环境光相互作用下的闪烁问题则研究较少。2014年夏振平等提出了对快门式立体显示中环境光闪烁的影响研究^[9],但该研究是基于快门眼镜对环境光的开关调制作用,与体三维显示成像光信号与环境光的相互叠加原理并不相同。2016年陈燕燕等通过主客观测量的方法对两种光源下2D/3D显示之间的视疲劳差异进行研究^[10],该研究也是基于眼镜式3D显示器,并且实验光源参数固定,并未分析不同因素下环境光对于显示闪烁的影响。

本文通过客观理论分析和主观视觉感知实验相结合的方式,深入研究了环境光各参量对于真三维显示闪烁程度的影响。客观上,分析了环境光与固态体积式真三维成像光叠加后光信号的时域和频域特性;主观上,设计完成了两组视觉感知实验,获得了各参量下环境光对真三维显示闪烁的主观评分结果并进行了数据统计分析,研究了不同因素下环境光对真三维显示闪烁程度的影响效果,并在此基础上提出了改善显示闪烁的途径。

2 真三维显示与环境光

2.1 真三维成像原理

固态体积式真三维显示采用多层高透过率的

快速响应液晶光阀组成层叠式显示体,利用高速 DLP 投影机作为体素激活系统,将切片图像序列投射到液晶光阀上成像,其系统结构如图 1 所示。液晶材料广泛应用于各种显示技术中^[11-12],本文开发的固态体积式显示系统的显示体由 20 层聚合物稳定胆甾相液晶(Polymer Stabilized Cholesteric Texture, PSCT)光阀平行排列组成,液晶光阀在一定的驱动电场控制下具有快速响应的光电性能:在零电场下光阀具有高雾度特性,投影光线在其上散射成像,此时的状态称为“成像态”;施加一定电场光阀则转换为透明状态,投影光线直接透射,此时的状态称为“透明态”。在真三维系统工作时,每层光阀依次处于成像态截获对应深度的切片图像,通过快速扫描各层光阀,实现深度图像的融合而产生立体图像。

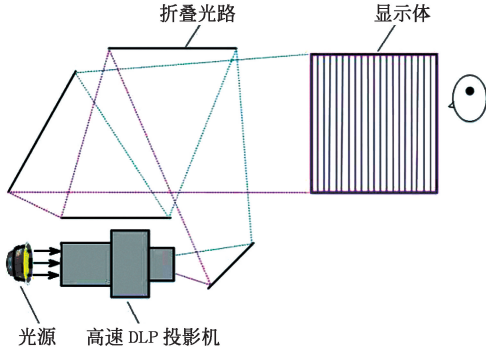
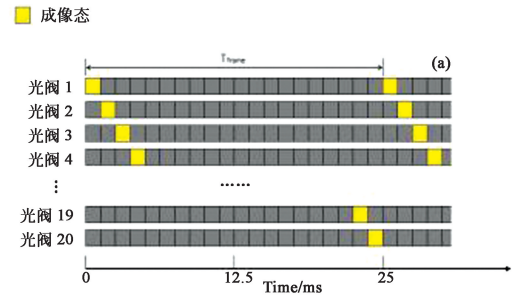


图 1 固态体积式真三维系统的成像原理

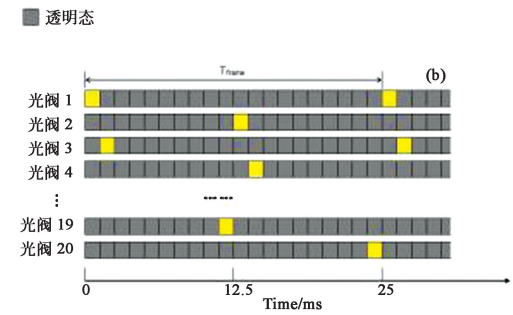
Fig.1 Imaging principle of solid-state 3D volumetric display system

与二维显示中逐行扫描与隔行扫描的方式相类似,真三维显示中显示体的扫描方式可以分为逐层顺序扫描和隔层交织扫描两种方式,如图 2 (a)和(b)所示。本文的真三维显示采用 40 Hz 的工作频率,即每秒钟对 20 层光阀完成 40 次循环扫描,因此每层光阀每次扫描成像时间为 1.25 ms。由于真三维显示在成像时采用了深度抗锯齿技术,其产生的映射体素分布在相邻光阀上,因此相比于传统的顺序扫描方式,交织扫描方式可以在一定程度上减弱真三维显示的闪烁程度^[13]。



(a) 顺序扫描

(a) Sequential scanning



(b) 交织扫描

(b) Interlaced scanning

图 2 真三维显示体的两种扫描方式

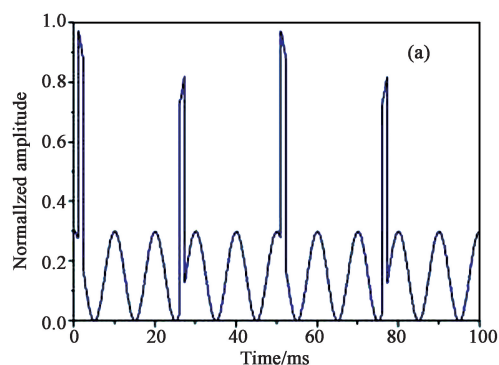
Fig.2 Two scanning methods of true 3D display body

2.2 成像光信号与环境光的叠加

目前室内照明灯具主要有白炽灯、日光灯、LED 灯等,由于中国大陆地区采用的交流电主频率为 50 Hz,因此灯具输出光源的调制主频率一般以 100 Hz 为常见。真三维显示系统如果在 100 Hz 环境光的室内照明情况下工作,成像光信号和照明环境光会同时进入观看者的眼睛,两种光信号产生叠加。图 3 为日光灯照明条件下光电探测器采集到的真三维成像光信号的情况,其中图 3(a)为信号归一化后的时域波形,可以看出经过叠加的光强信号仍然为周期性变化信号并且满足狄里赫利 (Dirichlet) 条件,因此该光信号可以通过傅里叶变换表示为公式(1):

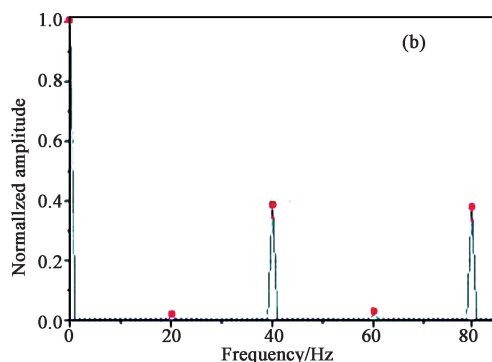
$$L(t) = L_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{T} \int_0^T L(t) \cos(n \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t) dt \cdot \cos(n \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t) + \frac{2}{T} \int_0^T L(t) \sin(n \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t) dt \cdot \sin(n \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t) \right], \quad (1)$$

式中: L_0 为光信号的亮度平均值, T 为信号的周期。采用傅里叶变换后,光信号被分解为直流分量和一系列简谐分量之和,图 3(b)为归一化后的频域幅值谱。其中,频率为零的直流分量对应的是平均亮度,基频 40 Hz 处的幅值最大。可以看出,在频谱中除了成像光信号和环境光信号包含的原有频率分量外,还产生了两种信号各频率分量的和频和差频,如 20 Hz、60 Hz 等。



(a)时域图

(a)Time domain



(b)时域图

(b)Frequency domain

图 3 环境光与成像光信号的叠加

Fig.3 Superposition of ambient light and imaging light signal

根据 Kelly 所提出的时间对比度灵敏函数 (Temporal Contrast Sensitivity Function, TCSF) 理论,人类视觉对于不同频率的光刺激所产生的响应灵敏度符合公式(2)^[14]:

$$F_{\text{TCSF}}(\omega) = \xi | (1 + i2\pi\omega\tau)^{-n_1} - \zeta (1 + i2\pi\omega\kappa\tau)^{-n_2} |, \quad (2)$$

式中: ω 为频率, $i=\sqrt{-1}$, $\xi=148.7$, $\zeta=0.882$, $\tau=0.002\,67$, $\kappa=1.834$, $n_1=15$, $n_2=16$ 。标准参数下的 TCSF 响应曲线在 10 Hz 左右达到最大值,随频率增加函数值快速下降,40 Hz 时函数值在峰值的 5% 以下,60 Hz 以上频率时对于闪烁的影响基本可以忽略。对于真三维成像光信号和环境光信号叠加产生的 20 Hz 低频分量而言,由于此频率的下的 TCSF 值较大,会对显示闪烁产生较为严重的影响。

3 环境光对显示闪烁的影响

3.1 视觉感知实验设计

为进一步研究环境照明光对固态体积式真三维显示闪烁的影响,本文采用参数可调的 LED 照明光源,基于固态体积式真三维显示系统设计完成了两组视觉感知实验,并对实验结果进行了统计分析。

试验中使用的 LED 照明光源功率为 50 W,色温 6 000 K,通过脉宽调制方式控制参数变化,调节参数包括频率、最大光强和占空比。试验中,将 LED 光源悬挂于真三维显示系统正上方,确保成像光与照明光可以同时进入测试者眼睛。两组实验分别在真三维显示顺序扫描模式和交织扫描模式下所进行,显示内容为亮度分布均匀的彩色三维图像。实验涉及的影响因素分别为:环境光调制频率、最大光强及调制占空比。其中,环境光调制频率具有 6 个参数:30、40、60、75、100、120 Hz;最大光强具有 3 个参数:低、中、高,其中低光强约为中光强的 50%,中光强约为高光强的 50%;调制占空比具有 3 个参数:25%、50%、75%。

实验受试人数为 16 人,其中男 10 人,女 6 人,年龄范围在 20~29 周岁之间,平均年龄 23.8 周岁,所有受试者双眼视力(或校正后视力)达到 1.0 以上,实验中控制环境温度、湿度等条件符合 VESA 标准。实验中对感知到的闪烁程度采用 ITU-RBT.500 标准中规定的 5 分制方法进行评分,如表 1 所示,分值越低代表感受到的闪烁感越强烈。

表 1 视觉评价实验评分标准

Tab.1 Visual evaluation experimental scoring standard

分数	闪烁可见程度
5	不可见
4	轻微可见
3	中度可见
2	明显可见
1	非常明显可见

3.2 实验结果分析

实验过程中保持其中两个影响因素为默认值,改变另一个影响因素的参数完成测试。其中,环境光调制频率默认值为 75 Hz,最大光强默认值为中,调制占空比默认值为 50%。实验完成后,利用 SPSS 19.0 软件对评分结果进行数据统计分析,结果如表 2 所示。方差分析(ANOVA)结果表明,两组实验中的频率、最大光强以及调制占空比对闪烁程度的主观感受均有显著性影响($\text{sig.} < 0.001$)。

表 2 实验数据的方差分析结果

Tab.2 ANOVA analysis results of experimental data

	因素	自由度	F 值	显著性(sig.)
实验 1	频率	5	257.361	< 0.001
	最大光强	2	10.867	< 0.001
	占空比	2	8.413	< 0.001
实验 2	频率	5	259.666	< 0.001
	最大光强	2	12.629	< 0.001
	占空比	2	8.891	< 0.001

图 4 所示为视觉感知实验中各影响因素评分结果的平均值和误差范围。其中,频率的 6 个参数中 40 Hz 和 120 Hz 评分接近 5 分,基本无闪烁感;100 Hz 评分在 4 分左右,存在轻微闪烁感;30 Hz、60 Hz 和 75 Hz 情况下由于光信号叠加产生了低频信号,评分较低(2 分左右或以下),存在明显闪烁感。最大光强的 3 个参数对应评分随光强增强呈现依次下降趋势,最大光强越强评分越低。调制占空比的 3 个参数对应评分随占空比增大呈

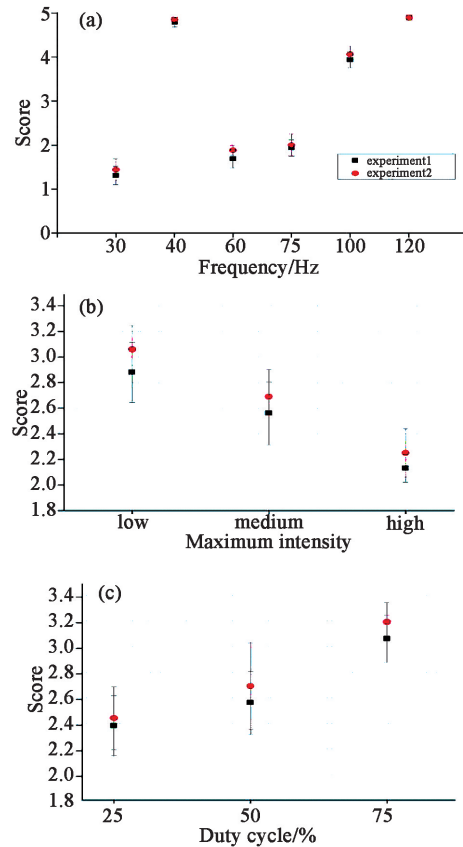


图 4 视觉感知实验评分结果。(a)各频率评分;
(b)各最大光强评分;(c)各占空比评分。

Fig.4 Scores of visual perception experiments.
(a)Scores with different frequencies;(b)
Scores with different maximum lumi-
nance;(c)Scores with duty cycles

现依次上升趋势,占空比越大评分越高。此现象可以从人眼视觉暂留效应方面得以解释:占空比越大,环境光信号越接近直流信号,其信号的直流分量占比越大,而低频分量占比越小。同时可以看出,在交织扫描模式下,各参数对应的评分均有不同程度上升,表明交织扫描模式可以减轻真三维显示的闪烁程度。

为进一步验证主观试验结果与客观评价之间的吻合程度,本文采用 TCSF 对归一化幅值谱对比度加权闪烁程度评价模型对闪烁感进行客观评价,即将时间对比度灵敏函数(TCSF)与归一化幅值谱对比度在对应频率相乘,得到 TCSF 加权的对比度(CSWC),取各主频对应的 CSWC 之和作为闪烁程度的客观评价指标^[13]:

$$\text{CSWC} = \sum_{j=1}^n F_{\text{TCSF}}(\omega_j) \cdot \frac{\text{Amp}_j}{\text{Amp}_0}, \quad (3)$$

式中: $F_{\text{TCSF}}(\omega_j)$ 为 j 次谐波所在频率的时间对比敏感度函数值, Amp_j 为 j 次谐波幅值, Amp_0 为直流分量幅值。图 5 选取试验 2 中不同调制频率的情况作为示例, 给出了客观量化评价结果。

对图 5 中所涉及实验内容的评分结果和对应的 CSWC 估算值进行相关性分析, 结果显示 CSWC 模型的客观评价结果与主观实验评分结果高度一致, 具有极高的线性相关度 ($R^2 > 0.99$)。

3.3 讨论

从视觉感知实验和模型估算结果来看, 成像

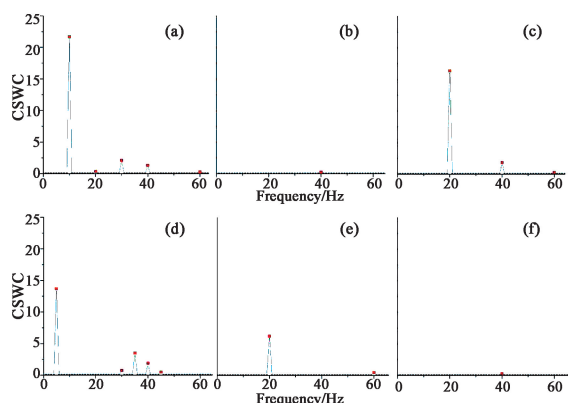


图 5 不同频率下经时间对比敏感度函数加权的幅值谱对比度。(a) 30 Hz; (b) 40 Hz; (c) 60 Hz; (d) 75 Hz; (e) 100 Hz; (f) 120 Hz.

Fig.5 Temporal contrast sensitivity function weighted amplitude spectrum contrast under different frequencies. (a) 30 Hz; (b) 40 Hz; (c) 60 Hz; (d) 75 Hz; (e) 100 Hz; (f) 120 Hz.

光信号与环境光源的频率不匹配是造成环境光加剧显示闪烁程度的首要因素。从评分结果可知, 40 Hz、120 Hz 的环境光频率对于显示闪烁的影响可以基本忽略; 当环境光频率成分与成像光信号频率成分的和差产生低频分量时, 会明显加剧显示闪烁程度。尤其当环境光主频率与成像光信号主频率的差频为低频信号时, 由于主频率能量较高, 会带来更加强烈的闪烁。因此, 对于工作频率为 40 Hz 的真三维系统, 建议室内光源的主频率为 120 Hz 或者更高倍频, 以消除环境光对显示闪烁的负面影响。

4 结 论

本文以理论分析和主观试验相结合的方式, 深入研究了各种参量下环境光对于固态体积式真三维显示闪烁的影响。通过将真三维成像光信号与环境光叠加后的时域信号进行频域变换, 分析了低频分量是影响闪烁的可能原因。同时, 基于参数可调的 LED 照明系统在不同扫描模式下完成了两组视觉感知实验, 并对实验结果进行了方差分析及闪烁程度客观评价。结果显示, 环境光的调制频率、最大光强及占空比对于真三维显示的闪烁程度的主观感受有显著性影响。其中, 环境光的频率是影响显示闪烁的首要因素, 环境光频率与显示刷新率相匹配是消除环境光对闪烁影响的主要途径。研究结果对基于层叠屏的三维显示在各种环境光条件下的闪烁优化和观看舒适度提升起到了积极的启发和指导作用。

参 考 文 献:

- [1] HOLLIMAN N S, DODGSON N A, FAVALORA G E, *et al.* Three-dimensional displays: a review and applications analysis [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2011, 57(2): 362-371.
- [2] ZHANG H, ZHAO Y, CAO L C, *et al.* Three-dimensional display technologies in wave and ray optics: a review [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(6): 060002.
- [3] SHEEDY J E. VDTs and vision complaints: a survey [J]. *Information Display*, 1992, 8(4/5): 20-23.
- [4] LI J, WANG A N, WANG J L, *et al.* Visual discomfort induced by three-dimensional display technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 030009.
- [5] 杨光磊, 井长龙, 裴治棋, 等. 固态体积式真三维立体显示器[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(1): 137-142.
YANG G L, JING C L, PEI Z Q, *et al.* Solid-state volumetric true 3D display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 137-142. (in Chinese)
- [6] KELLY D H. Theory of flicker and transient responses, I. Uniform fields [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(4): 537-546.

- [7] KELLY D H. Theory of flicker and transient responses, II. Counterphase gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(5): 632-640.
- [8] KELLY D H, SAVOIE R E. Theory of flicker and transient responses, III. An essential nonlinearity [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1977, 68(11): 1481-1490.
- [9] 夏振平, 李晓华, 陈磊, 等. 对快门式立体显示中环境光闪烁的影响研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0733002.
XIA Z P, LI X H, CHEN L, *et al.* Study on the effect of ambient light flicker in stereoscopic display with active shutter glasses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0733002. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] 周建伟, 梁静秋, 梁中翥, 等. 液晶调制光子晶体微腔光衰减器[J]. 发光学报, 2013, 34(2): 245-250.
ZHOU J W, LIANG J Q, LIANG Z Z, *et al.* Tunable two-dimensional photonic crystals cavity attenuator using liquid-crystal [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(2): 245-250. (in Chinese)
- [12] 陆红波, 张超, 吴少君, 等. 发光液晶材料的合成及发光特性研究[J]. 发光学报, 2015, 36(11): 1227-1232.
LU H B, ZHANG C, WU S J, *et al.* Synthesis and photoluminescence property of luminescent liquid crystal material [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(11): 1227-1232. (in Chinese)
- [13] 方勇, 芦云龙, 吴华夏, 等. 固态体积式真三维显示中的闪烁评价及优化[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0133003.
FANG Y, LU Y L, WU H X, *et al.* Evaluation and optimization of flicker in solid-state 3D volumetric display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0133003. (in Chinese)
- [14] WATSON A B. Temporal sensitivity [M]//BOFF K R, KAUFMAN L, THOMAS J P. *Handbook of Perception and Human Performance*. New York: Wiley, 1986.

作者简介: 杨良勇(1973—), 安徽芜湖人, 工程师, 主要从事无线及视频传输、电路设计等方面的研发。E-mail: microdisplay@126.com