

文章编号:1007-2780(2017)11-0934-09

CRT 与 LCD 技术的视觉刺激显示性能评价

罗 粟,詹长安*

(南方医科大学 生物医学工程学院,广东 广州 510515)

摘要:为了定量评价两种技术在视觉研究实验中的适用性,本文根据文献分析和视觉研究需求设计了显示器性能测试系统与测试流程,对一台阴极射线管(CRT)显示器和两台通用液晶显示器作为视觉刺激显示设备的关键性能进行测试。结合心理物理学理论,特别是韦伯定律,详细地分析和比较了各项测试结果。实验结果显示所有的显示器有不同的 Gamma 特性,需要进行相应的 Gamma 校正之后才能线性呈现图像的灰度级;CRT 显示器在响应时间上具有绝对优势,但屏幕空间均匀性和独立性较差;相比于 CRT 显示器,LCD 显示器具有较高的亮度和较好的空间均匀性和独立性,但是响应时间偏慢,而且相邻两帧图像之间独立性较差。这些测试结果表明,CRT 显示器仍然是高动态特性视觉刺激显示的首选,而 LCD 显示器可以用于呈现对空间亮度一致性和空间的独立性要求高,但对响应速度要求不高的视觉刺激。

关键词:液晶显示器;阴极射线管显示器;韦伯定律;视觉刺激器;性能测试

中图分类号:TP302.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173211.0934

Assessment of CRT and LCD technologies for the presentation of visual stimuli

LUO Su, ZHAN Chang-an*

(School of Biomedical Engineering, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China)

Abstract: To quantitatively evaluate the suitability of LCD for vision research experiments, this study developed a display performance testing system and process inspired by relevant literature with consideration of visual research requirements, and measured the key performance of a cathode ray tube (CRT) display and two general-purpose liquid crystal displays (LCDs). We compared these displays in performance measurements and analyzed the data regarding psychophysical theories, the Weber's Law in particular. Experimental results demonstrated that these displays show different Gamma properties, required Gamma-correction to linearize the gray levels for visual stimulus presentation. The CRT display had the absolute advantage in terms of response time and temporal independence, but it was inferior to the LCDs in spatial uniformity and spatial independence. In contrast, the LCD monitors had higher brightness and better spatial uniformity and spatial independence, but their response time was longer and their adjacent frames were short of independence. These findings suggest that CRT monitors still be the preferred option for presenting dynamic stimuli, whereas the LCD mo-

收稿日期:2017-03-28;修订日期:2017-07-13.

基金项目:国家自然科学基金 (No. 61271154, No. 61172033)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61271154, No. 61172033)

* 通信联系人, E-mail: cznelab@smu.edu.cn

nititors best be used for presenting static stimuli demanding spatial independence and spatial uniformity.

Key words: liquid crystal display; cathode ray tube; weber's law; visual stimulator; performance evaluation

1 引 言

基于计算机编程和阴极射线管(Cathode Ray Tube, CRT)显示器的视觉刺激器被广泛运用于现代心理物理及电生理实验。随着科学技术的发展,新型显示设备,特别是液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)以其体积小、厚度薄、重量轻、耗能少、无闪烁、几何失真小、抗干扰等诸多优点获得广泛的商业应用。CRT 显示器在体积、重量、功耗、环保等方面的劣势逐渐凸显,在商用显示器市场中逐渐被淡化。但是在视觉研究中, CRT 显示器因具有可视角度大、响应时间极短等优点,被认为是当前最适合的视觉刺激器。CRT 显示器的制造商早在 10 多年前就已经开始减少并最终停止了 CRT 显示器的生产,目前市场上的 CRT 显示器已是凤毛麟角,大多数的视觉研究只能依赖于旧的、越来越不稳定的 CRT 显示器^[1-2]。

为了克服这一矛盾,一些从事视觉研究相关的技术人员着手研究 LCD 等新型显示技术的适用性^[1-8]。过去的研究发现少数高端 LCD^[5-8]和 OLED^[9]显示器无论在空间还是时间特性上都可以与 CRT 显示器相媲美,甚至优于 CRT 显示器。但是这些显示器价格高昂,另一方面,普通 LCD 的标称性能参数也获得了很大的提升,部分研究也提示普通 LCD 较 CRT 显示器还存在一些优势,包括亮度高、显示画面连续,稳定无闪烁、相邻像素独立等^[6,10]。客观而系统地定量评价 LCD 与 CRT 显示器的特性是甄别它们是否满足视觉刺激显示性能的基本需求。

为了满足这一需要,本文参考已有文献和视觉刺激特征设计了显示器测试系统与测试流程,并对常见的普通 LCD 和一台旧的但使用正常的 CRT 显示器的各项关键性能进行测试和量化比较。这些性能包括屏幕亮度响应线性、稳定性,亮度空间分布均匀性及独立性,亮度时间响应等特征。结果表明普通 LCD 和 CRT 显示器分别在不同指标方面存在优势,提示在不同的视觉研究中

可以选择不同的显示技术,分别发挥它们的性能优势。本研究对量化分析显示系统性能,科学选择显示设备进行视觉心理物理和电生理等研究具有一定指导意义。

2 方 法

2.1 显示器选择及参数设置

本文主要目的是比较 CRT 显示器与通用 LCD 显示器的视觉刺激显示性能,以探索 LCD 显示器是否适用于视觉研究相关实验。选用一台旧的但使用正常的专业 CRT 显示器(EIZO FLEXSCAN T962)和 2 台普通的 LCD 显示器(Samsung S27B370H, Dell E2414H)进行比较。显示器的出厂标称参数如表 1 所示,本实验中屏幕刷新率和分辨率,均采用推荐值。

2.2 性能参数定义

作为视觉刺激显示设备,关键性能包括屏幕亮度响应线性度,稳定性、亮度的空间均匀性,独立性、亮度变化的时间响应及亮度转换响应时间等^[7-8]。

(1)亮度响应线性度:计算机程序通过向显卡发送不同灰度值的图像改变显卡的输出电压从而控制显示器屏幕的亮度。屏幕亮度响应描述的是显示器屏幕输出亮度与计算机程序发送图像的灰度值之间的关系,根据广泛的实测经验数据,这一关系常用 Gamma 曲线表示^[11]。Gamma 曲线通常是一个乘幂函数,

$$y=a(x+e)^{\gamma}, \quad (1)$$

其中: y 为屏幕输出的亮度, x 为输入的灰度值, a 和 e 分别是拟合系数和补偿系数,乘幂值 γ 为 Gamma 值。亮度响应线性度可用 Gamma 值表示,当 Gamma 值等于 1 的时候,曲线为与坐标轴成一条直线,这个时候表示输入和输出密度相同。高于 1 的 Gamma 值将会造成输出亮化,低于 1 的 Gamma 值将会造成输出暗化。Gamma 值越接近 1 显示器的性能越好,细节表现更充分。

(2)亮度响应的稳定性:显示器的亮度可能随着点亮后的时间长短发生缓慢变化,例如 CRT

显示器需要预热半小时以上才能进入比较稳定的工作状态^[12-13]。即使预热过显示器,特别是使用时间过长的旧 CRT 显示器,亦可能存在亮度稳定性问题。为了检验这一指标,本文通过多次重复测量并计算变异系数来衡量屏幕的稳定性,变异系数的定义如式(2)。

$Coef_variation = (std(L))/mean(L)$, (2)
其中: $std(L)$ 和 $mean(L)$ 表示 6 次重复测量的方

差和均值。

(3)亮度的空间均匀性:理想情况下,计算机生成的同一灰度图像,在显示器的不同区域显示的亮度一致。实际上,几乎所有的显示器在屏幕的不同区域都会存在亮度差异,当这种差异超过人眼视觉对亮度差异感知阈值时,采用这样的显示器作为视觉刺激器将会影响实验结果。

表 1 显示器标称参数

Tab.1 Monitors specification parameters

显示器型号	视角(水平/垂直)/(°)	屏幕刷新率/Hz	屏幕分辨率/pixel	最大亮度/(cd · m ⁻²)	响应时间/ms
EizoT962	180/180	85	1024×768	150	<1
Samsung S27B370H	160/170	60	1920×1080	300	2
Dell E2414H	160/170	60	1 920×1 080	250	5

因此显示器亮度在空间上的均匀性是其作为视觉刺激器的另一重要指标。本文将屏幕划分为 3×3 共 9 个大小相同的矩形区域,以正中央的区域为参考,亮度均匀性用各个区域与中央区域的亮度差异的百分比表示,最大亮度差异用 Michelson 对比度表示,如式(3)。

$$\text{Michelson contract} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (3)$$

式中: $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别为同等刺激下 9 个区域的最大和最小亮度。

(4)亮度的空间独立性:显示器屏幕某一区域的亮度受周围区域的亮度影响的程度。理想情况下,屏幕上某一区域的亮度只与所给的刺激强度有关,而与周围的亮度变化无关。实际中,屏幕上任何一个区域的亮度都可能会随着周围亮度的变化引起不同的变化,特别是 CRT 显示器。当一个区域的亮度在周围区域亮度变化下发生变化的程度大于人眼最小可觉差(Just Noticeable Difference, JND)时将影响视觉有关的实验结果。本文分别测试屏幕左上角与正中央两个区域在黑、灰、白三种状态下的亮度的空间依赖性。由于周围区域的亮度变化引起测试区域的亮度变化的严重程度用 Weber 对比度^[14-15]的最大值表示。Weber 对比度定义如下。

$\text{Weber contrast} = \Delta L / L$, (4)
其中: L 为参考亮度, ΔL 为相对亮度变化。

(5)亮度变化时间响应:当给予屏幕一定的灰度图像刺激时,屏幕亮度随时间变化的特性。从呈现视觉刺激的角度,本文主要考察重复相同的刺激的时间响应的稳定性和相邻刺激的响应的独立性。本文通过测量屏幕对连续的同一灰度图像的响应曲线来观察亮度变化时间响应的稳定性和独立性。

(6)亮度转换响应时间:根据 ISO 9241-305 标准,响应时间定义为亮度在 10%~90%之间变化所需的时间。响应时间又分为上升时间和下降时间。对于 CRT 显示器来说,屏幕由高速的电子束击打荧光粉发光,当刺激开始后,屏幕常能迅速到达目标亮度,因此 CRT 的响应时间极短,通常为几十到几百个微秒。LCD 则通过改变对应的像素的电压,从而改变液晶分子的排列而使屏幕发光或变暗。由于在电压改变后,液晶分子重新排列,显示器完成亮度转换需要一定时间。

2.3 测试系统设计

本文采用 AMD Radeon R7 200 显卡,结合 Psychological Toolbox^[16-17]在 64 位的 Windows 7 系统上用 MATLAB 编程生成不同的灰度图像刺激。采用 TES-1339 亮度计测量显示器的亮度响应和亮度空间分布等。为了测试显示器亮度的时间动态特性,本文设计了较高响应速度的光电测量系统,系统构成如图 1(a)所示,输入输出线性测试如图 1(b)所示。

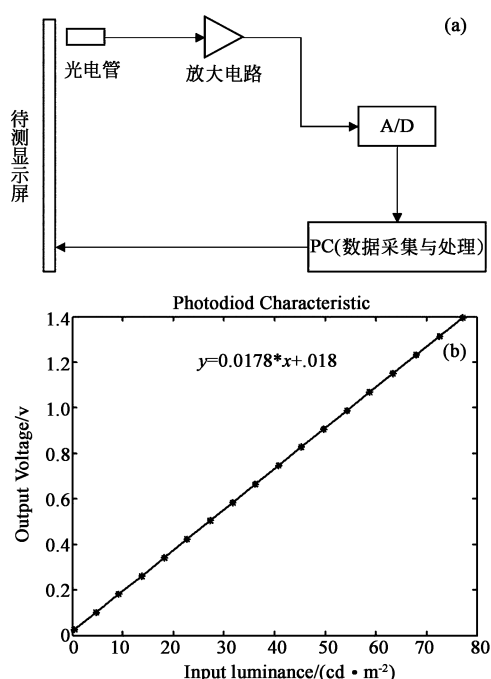


图 1 (a) 光电测量系统, (b) 系统验证: 输入输出响应曲线

Fig.1 (a) Photoelectric measuring system, (b) System verification: Input/output response

该系统中,光电管采用具有高度线性、高灵敏度、低暗电流,且光谱响应接近人眼的硅 PN 型光电二极管 BPW21R,工作在反向偏置状态,即光导模式,能精确快速响应屏幕亮度的动态变化。放大电路为采用单电源运算放大器 CA3140 构成的可调放大倍数的电流-电压转换电路。测试屏幕的亮度由 PC 通过向显卡发送不同灰度值的图像改变显卡的输出电压控制^[10],光电管固定在屏幕右上角,将屏幕亮度的变化转换为电流的变化,放大电路将电流的变化转换为电压的变化。A/D 转换采用由 Windows 操作系统控制的 USB 接口全速数据采集装置 USB-1208FS,采样率为 50 kHz。计算机通过 USB 口输出 +5 V 电压给系统供电和读取数据。通过数据采集软件 MCC DAQ 可对采集到的数据进行实时的观察与分析。图 1(b)为系统线性验证曲线,横坐标为采用亮度计测量的屏幕亮度,纵坐标表示系统输出的电压,采用最小二乘拟合得到, $y = 0.0178x + 0.018$, 拟合度为 0.999 3。可见,系统的输入输出呈线性关系,且暗电流极小,采用该系统可精确地测量显示器屏幕的亮度变化的动态特性。由于显示器亮度和响应速度等会随着显示器的温度发生变化,

在进行各项性能测试之前将显示器打开预热 45~60 min^[12-13]。为避免环境光线的影响,测试在密闭的房间里进行。

3 各项性能测试结果及分析

3.1 亮度响应的线性和稳定性

通过 MATLAB 程序向显示屏依次发送灰度值为 0、16、32、48、...、240、255 的全屏图像,对应 17 个亮度等级,采用亮度计测量每个等级对应的屏幕亮度,重复 6 次,平均并标准化得到各显示器屏幕的亮度响应如图 2(a)所示,对应的变异系数如图 2(b)所示。从图 2(a)中可看到, Samsung S27B370H 的亮度输出与输入的灰度值的关系接近线性,采用 Gamma 曲线拟合得到 Gamma 值为 $1.418(\pm 0.0017)$ 。其次为 Dell E2414H, Gamma 值为 $1.873(\pm 0.0025)$,在低亮度时,输出随输入缓慢变化,随着亮度增加,输出随输入的变化愈加明显,但在输入为灰度值 240 时达到饱和,输入增加,亮度不再变化。EizoT962 的 Gamma 值为 $2.178(\pm 0.0045)$,屏幕亮度随输入的灰度缓慢单调地增加。Gamma 校正后的输入灰度级-亮度输出关系如图 2(a)的虚线所示。Gamma 校正的线性度用非线性误差表示,三台显示器校正后的非线性误差分别为 1.69% (EizoT962), 4.13% (Samsung S27B370H), 9.44% (Dell E2414H)。数据表明, Gamma 校正后, CRT 显示器 EizoT962 的线性度最好,而 Dell E2414H 的线性度最差。图 2(b)的亮度变异系数描述了在重复测量下屏幕各等级亮度的稳定程度。三台显示器的亮度变异系数随着亮度的增加而变小,但在高亮度时又出现很小的波动。在低亮度时, EizoT962 和 Dell E2414H 重复测量的波动较大,经过 Gamma 校正后,数据显示三台显示器的变异系数都有所降低。整体而言, Samsung S27B370H 的线性及稳定性较好。

根据以上测量,计算各显示器的最大、最小亮度及对比度如表 2。对比表 1, EizoT962 的实际亮度与出厂标称参数相比偏低, Samsung S27B370H 和 Dell E2414H 的亮度与出厂标称参数相比偏高。当显示器输入的图像灰度为 0 时,各显示器的亮度输出并非全黑,其中 Samsung S27B370H 亮度最大。

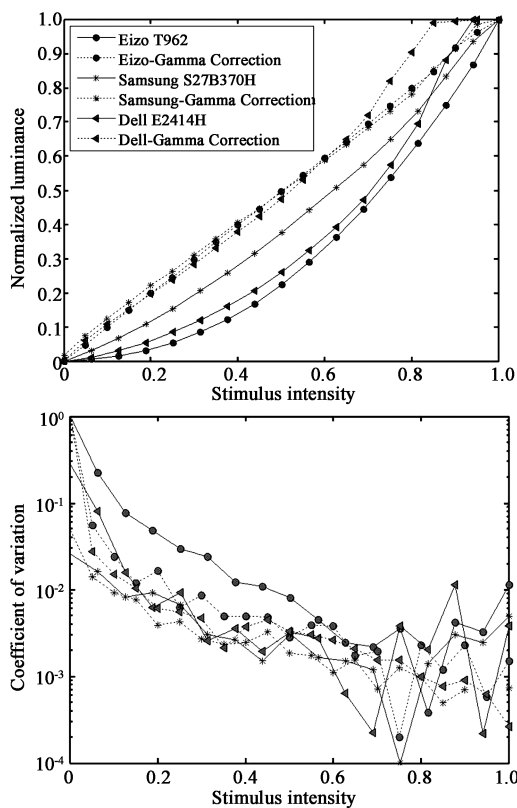


图 2 归一化亮度响应及变异系数

Fig. 2 Normalized luminance response and coefficient of variation

表 2 最大/最小亮度及对比度

Tab.2 Maximum and minimum brightness and contrast

显示器 型号	最大亮度/ ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	最小亮度/ ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	对比度/ %
EizoT962	130 ± 0.25	0.54 ± 0.12	99.17
Samsung-	320 ± 1.51	1.52 ± 0.24	99.05
Dell E2414H	272 ± 0.58	0.94 ± 0.18	99.31

3.2 亮度的空间均匀性

将被测显示屏均匀划分为 3×3 共 9 个大小相同的矩形区域,程序控制显示全屏的全黑 ($\text{rgb}_8 = 0$),中灰 ($\text{rgb}_8 = 128$),全白 ($\text{rgb}_8 = 255$) 的图像,用亮度计分别测量每个矩形区域的亮度。该过程重复 6 次,3 种灰度级下的归一化平均空间亮度分布如图 3(a)、(b)、(c) 所示。每个分布右下角的数字为对应灰度级下的 Michelson 对比度,代表 9 个区域的亮度最大差异。在屏幕全黑的状态下,各显示器屏幕的亮度均匀性

最差,相对中央区域的亮度差异最大为 35%,CRT EizoT962 的 Michelson 对比度高达 31%。在中灰和全白两种状态下,3 台显示器的亮度均匀性有所提升,尽管从亮度分布图来看,各显示器的亮暗区域各不相同但三者之间的 Michelson 对比度值区别不明显,且较全黑的状态都有所降低。

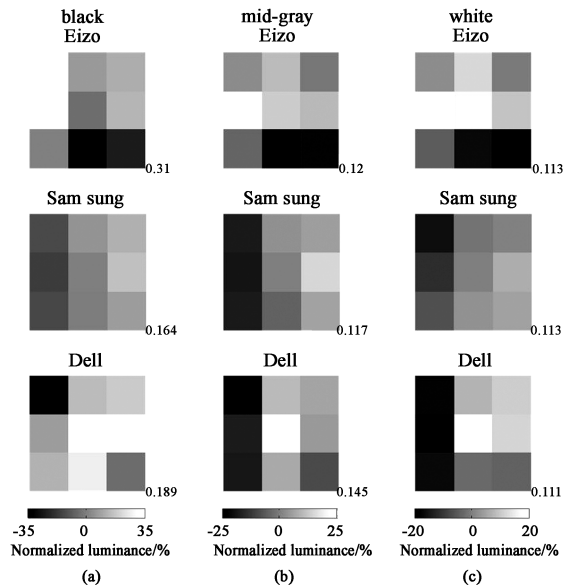


图 3 显示器屏幕亮度在 3 种状态下的空间分布。
(a) 全黑,(b) 中灰,(c) 全白

Fig.3 Uniformity of spatial luminance distribution.
(a) black, (b) mid-gray, (c) white

3.3 亮度的空间独立性

分别选择左上角和中央 $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$ 的矩形作为测试区域,在测试区域显示中灰图像,保持中等亮度,屏幕其余区域在全黑、中灰和全白 3 个亮度状态之间变化,分别测量各个状态下测试区域的亮度,重复 50 次,记录到左上角及正中央两个测试区域在各个状态下的亮度如图 4 所示,误差棒显示了每组数据的平均值和标准差,图中文本为秩和检验 p 值和最大 Weber 对比度 k 。从秩和检验的结果来看, $p \ll 0.01$,表明所有显示器的左上角和正中央在 3 种情况下的亮度都有显著差异。但从每种情况下测量的平均亮度的绝对变化(纵坐标)来看,测试区域的亮度受其它区域亮度的变化的影响并不大(CRT 的最大绝对变化 $< 2 \text{ cd}/\text{m}^2$, LCD 的更小 $< 1 \text{ cd}/\text{m}^2$),再观察最大 Weber 对比度 k 的值可以发现,除了 CRT EizoT962 显示器,其余显示器的 Weber 对比度

都小于人眼能感觉到的临界亮度比 $0.017^{[14,18]}$ 。因此两台 LCD 屏幕的亮度受周围区域亮度变化的影响不足以引起人眼的感知。相比之下,CRT

EizoT962 显示器屏幕亮度的独立性较差,根本原因是 CRT 显示器的相邻像素点不独立,而 LCD 克服了这一缺陷。

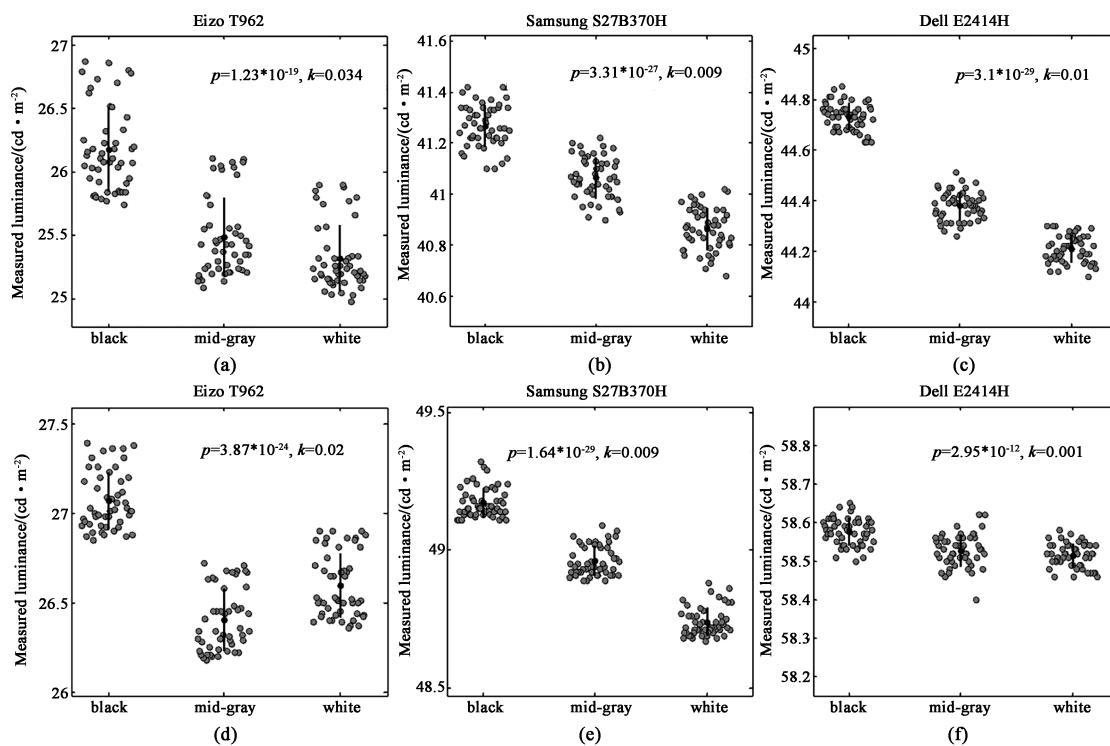


图 4 (a-c) 屏幕左上角的亮度的空间独立性,(d-f) 屏幕正中央的亮度的空间独立性

Fig.4 Spatial independence of luminance: (a-c) up-left corner of screen, (d-f) center of screen

3.4 亮度变化时间响应

显示屏显示 N ($N=1, 2, 3, 4, 5$) 帧白色图像,间隔 0.1 s 的黑屏,重复 20 次。采用 2.3 节中设计的光电检测系统记录到 3 种显示器的时间响应特性如图 5(a-c) 所示。图中,从左至右不同的颜色表示连续的白色图像帧数从 1~5 依次增加,当 $N>1$ 时,记录到的前 $N-1$ 帧响应与 $N-1$ 帧白色图像的响应几乎完全重合,3 台显示器的时间响应均显示出较好的稳定性。从图 5(a) 可看到,CRT EizoT962 在刺激开始后,屏幕亮度快速上升到最大亮度然后迅速衰减到最暗,直到下一帧刺激图像到来。两帧刺激图像间的时间间隔 T 等于屏幕刷新率 f 的倒数,每帧时间内,屏幕暗的状态比亮的状态要长。这一特性,使得 CRT 显示器前后两帧视觉刺激间有良好的独立性,使用时,屏幕的刷新率要足够高才能避免人眼感知到屏幕的闪烁。图 5 (b)和(c)分别为 LCD Samsung S27B370H 和 Dell E2414H 的亮度时间响应,两者都表现出典型 LCD 的采样-保持特性。

屏幕在一帧时间($T = 1/f = 16.67$ ms)内上升到当前刺激图像的最大亮度并保持到下一帧刺激图像的到来。若下一帧图像为相同或较高亮度,则屏幕亮度保持或者继续上升;若下一帧为较低的亮度,则屏幕亮度从第二帧图像刺激开始下降。两台 LCD 的后一帧图像的屏幕响应均受到前一帧图像响应的影响。这提示使用 LCD 显示器呈现视觉刺激时应考虑其相邻帧图像亮度的影响。另外,从图 (b-c) 可以看到,Samsung S27B370H 的屏幕在第一帧白色图像刺激的时间内基本上能达到最高亮度,而 Dell E2414H 连续给予两帧白色图像刺激才能使屏幕达到最大亮度。这两台 LCD 显示器的另一显著区别是响应时间不同。

本文对 3 台显示器的黑白上升响应时间和下降响应时间进行了测量。响应时间计算如图 5(d) 所示,以 Samsung S27B370H 为例,至少发送连续的 2 帧白色图像使屏幕达到最大稳定亮度才开始测量,对于 CRT 显示器由于亮度不连续只能在单帧图像时间内计算相应的响应时间。重复 20 次,

平均得到 CRT EizoT962 的黑白上升响应时间为 (0.54 ± 0.02) ms, 下降响应时间为 (1.4 ± 0.06) ms; LCD Samsung S27B370H 的黑白上升和下降响应时间分别为 (5.01 ± 0.13) ms 和 (2.07 ± 0.09) ms; LCD Dell E2414H 的黑白上升响应时间为 (5.18 ± 0.1) ms, 下降响应时间为 (3.07 ± 0.12) ms。

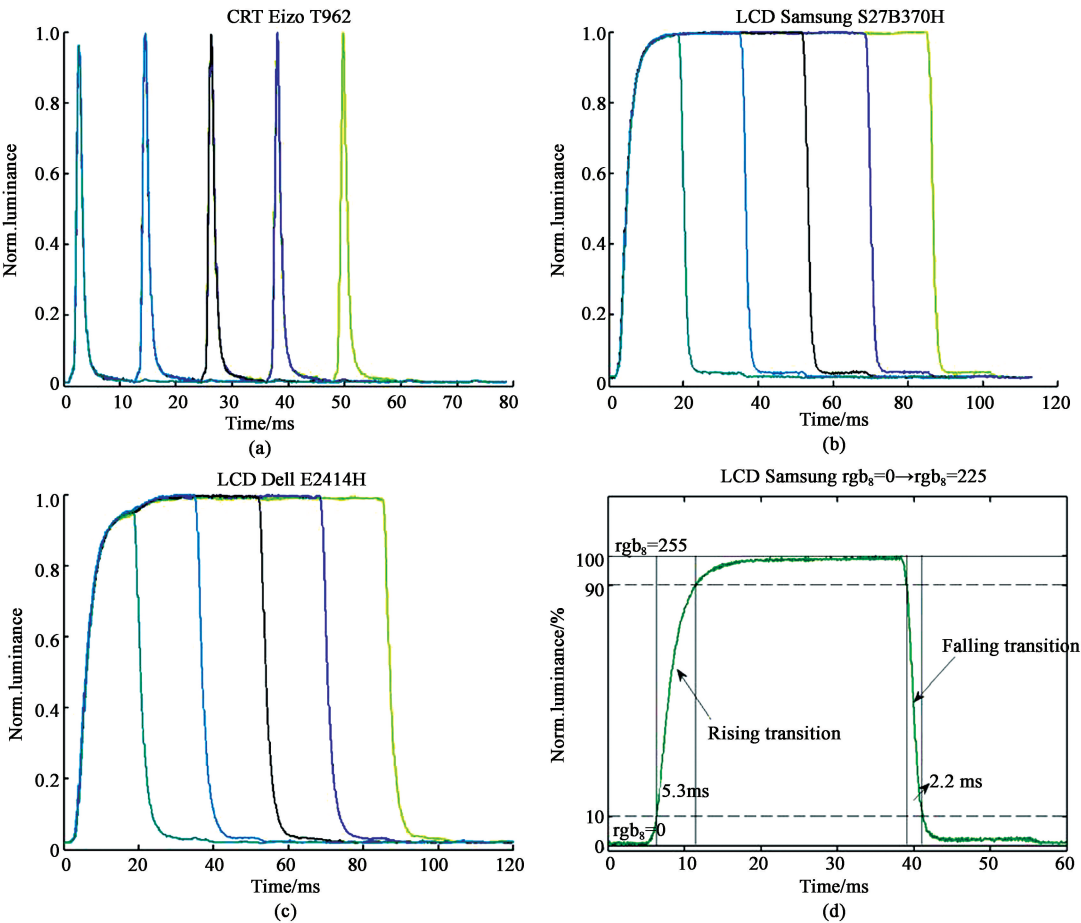


图 5 (a)、(b)、(c)显示器亮度变化时间响应,(d) 响应时间测量示意图
Fig.5 (a),(b),(c) Temporal response of luminance transition, (d) Schematic diagram of response time measurement

3.5 显示器性能分析归纳

综合以上测量结果和分析,对所测显示器的关键性能归纳如表 3 所示。可见,EizoT962 在时间响应上具有优势,但亮度低,在空间特性上表现较差,因此建议在要求视觉刺激相邻帧响应之间独立,但所需亮度不高的视觉实验中使用。在所测的三台显示器中,Samsung S27B370H 除了相

邻帧响应不独立以及上升响应时间较长,其它性能表现均比较好,可满足高亮度但响应速度较低的视觉刺激系统的要求。Dell E2414H 亮度响应线性及时间响应表现较差,但由于其典型的 LCD 采样保持特性以及较好的空间独立性使得其适合用来呈现静态的视觉图像。

表 3 显示器性能分析归纳

Tab.3 Summary of displays' performance

显示器型号	优势	劣势	建议使用情况
EizoT962	响应时间较短,时间动态特性好, Gamma 校正后可呈现线性输出	线性差,亮度低,稳定性,空间均匀性及独立性较差	对响应速度要求高,亮度要求较低的视觉实验

续 表

显示器型号	优势	劣势	建议使用情况
Samsung S27B370H	亮度高,亮度响应稳定,空间均匀性好,Gamma 校正后可呈现线性输出	上升响应时间长,相邻帧响应不独立	要求高亮度、响应较慢的视觉刺激系统
Dell E2414H	亮度输出连续,亮度空间独立性较好	线性较差,不能通过简单的 Gamma 模型校正,响应时间长,相邻帧响应不独立	呈现静态图像,对时间精度要求不高的场合

4 结 论

本文着眼于视觉刺激显示设备的关键性能,从通用的 LCD 显示器入手,定量评价了两台 LED 背光 TN 面板的 LCD 显示器和一台 CRT 显示器的视觉刺激显示特性。实验结果表明,CRT EizoT962 显示器在时间特性上具有绝对优势,但空间上的均匀性和独立性较差,继续使用可能对实验结果产生影响,以及较低的亮度亦不能满足要求高亮度视觉实验的需求。尽管从亮度响应曲线及 Gamma 值来看,EizoT962 较差,但通过简单的 Gamma 模型校正加以补偿亦可得到线性的输出,而 Dell E2414H 却不能通过简单的 Gamma 模型校正。Dell E2414H 有较好的空间

独立性及均匀性,适合用来呈现静态图像。Samsung S27B370H 具有较高的亮度和较好的亮度响应及空间均匀性,比较适合用来呈现高亮度但对响应速度要求不高的视觉刺激系统中^[19]。特别值得注意的是,Samsung S27B370H 厂家标称的响应时间 2 ms 实际为黑白下降响应时间(实测为 (2.07 ± 0.09) ms),而 Dell E2414H 的出厂标称响应时间 5 ms 指的是黑白上升响应时间(实测为 (5.18 ± 0.1) ms)。因此,在选择视觉刺激显示设备时需要根据实际运用对关键的性能参数进行验证才能判断是否满足视觉刺激要求。基于不同背光源和面板技术(例如 TFT,IPS,SIPS 等)的 LCD 性能也有所差异,视觉研究人员可参考本文提供的方案对具体显示器进行评估,根据所需的视觉刺激要求选择合适的显示设备。

参 考 文 献:

- [1] ELZE T, TANNER T G. Liquid crystal display response time estimation for medical applications [J]. *Medical Physics*, 2009, 36(11): 4984-4990.
- [2] ELZE T. Achieving precise display timing in visual neuroscience experiments [J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2010, 191(2): 171-179.
- [3] KIHARA K, KAWAHARA J I, TAKEDA Y. Usability of liquid crystal displays for research in the temporal characteristics of perception and attention [J]. *Behavior Research Methods*, 2010, 42(4): 1105-1113.
- [4] ELZE T, TANNER T. Dangerous liquids: temporal properties of modern LCD monitors and implications for vision science experiments [J]. *Perception*, 2011, 40(40): 175-181.
- [5] ELZE T, TANNER T G. Temporal properties of liquid crystal displays: implications for vision science experiments [J]. *PLoS One*, 2012, 7(9): e44048.
- [6] WANG P, NIKOLIĆ D. An LCD monitor with sufficiently precise timing for research in vision [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2011, 5: 85.
- [7] LAGROIX H E P, YANKO M R, SPALEK T M. LCDs are better: psychophysical and photometric estimates of the temporal characteristics of CRT and LCD monitors [J]. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 2012, 74(5): 1033-1041.
- [8] GHODRATI M, MORRIS A P, PRICE N S C. The (un)suitability of modern liquid crystal displays (LCDs) for

- vision research [J]. *Frontiers in Psychology*, 2015, 6: 303.
- [9] COOPER E A, JIANG H M, VILDAVSKI V, *et al.* Assessment of OLED displays for vision research [J]. *Journal of Vision*, 2013, 13(12): 16.
- [10] 刘长英, 车仁生, 黄庆成, 等. 视觉测量中光学特征点亮度控制方法研究[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(3): 93-96.
LIU C Y, CHE R S, HUANG Q C, *et al.* Control method for optical characteristic point luminance in vision measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(3): 93-96. (in Chinese)
- [11] KIM J Y, PARK C W. Display device and gamma data adjusting method thereof: US, 20090096744 [P]. 2009-04-16.
- [12] METHA A B, VINGRYS A J, BADCOCK D R. Calibration of a color monitor for visual psychophysics [J]. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 1993, 25(3): 371-383.
- [13] BRAINARD D H, PELLI D G, TOM R. *Display characterization* [M]//HORNACK J. *Encyclopedia of Imaging Science and Technology*. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [14] 黄小乔, 石俊生, 邵永航. 用显示器测量人眼视觉的亮度最小可觉差[J]. 液晶与显示, 2016, 31(2): 222-228.
HUANG X Q, SHI J S, TAI Y H. Measurement of just noticeable difference for luminance of Human visual system on liquid crystal display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(2): 222-228. (in Chinese)
- [15] 古斯塔夫·费希纳. 心理物理学纲要[M]. 李晶译. 北京: 中国人民大学出版社, 2015.
FECHNER G T. *Element der Psychophysik* [M]. LI J, trans. Beijing: Chinese People's University Press, 2015. (in Chinese)
- [16] PELLI D G. The VideoToolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies [J]. *Spatial Vision*, 1997, 10(4): 437-442.
- [17] BRAINARD D H. The psychophysics toolbox [J]. *Spatial Vision*, 1997, 10(4): 433-436.
- [18] 卢彦飞, 张涛, 章程. 应用 log-Gabor 韦伯特征的图像质量评价[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(11): 3259-3269.
LU Y F, ZHANG T, ZHANG C. Image quality assessment using log-Gabor Weber feature [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(11): 3259-3269. (in Chinese)
- [19] 吴正华. 稳态视觉诱发电位在脑机接口及认知过程中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
WU Z H. Study on the SSVEP s application in brain-computer interface and cognitive task [D]. Chengdu: University of Electronic Science and technology of China, 2008. (in Chinese)

作者简介: 罗粟 (1995—), 女, 贵州普安人, 硕士, 主要研究方向为视觉感知与运用。E-mail: milletjoan6@gmail.com
詹长安 (1972—), 男, 安徽安庆人, 博士, 副教授, 主要研究方向为神经科学, 生物医学信号处理, 生物医学仪器等。E-mail: cznelab@smu.edu.cn