

文章编号:1007-2780(2025)10-1470-12

基于自适应光晕抑制算法的车载分区背光显示系统的研究及设计

路家乐, 隋纪祥*, 黄海波, 胡 瑞, 曹玉平, 胡 澳
(湖北汽车工业学院 人工智能学院, 湖北 十堰 442000)

摘要: Mini-LED分区背光液晶显示系统凭借其卓越的局部调光能力与超高对比度特性成为车载HDR显示器的主要发展方向之一,但是在复杂行车场景如隧道快速穿越、夜间灯光多变等,现有的定加权系数误差修正等背光提取算法存在光晕扩散与亮度非线性失真的问题。本研究进行了不同环境光、不同光照度下人眼视觉感知实验。通过双因素方差分析表明环境光对光晕感知的调控主导性,并基于Sigmoid函数和指数衰减函数构建了光晕指数-环境光照度-亮度差值模型,得到光晕指数(Halo, H)与环境照度 E 的关系,对其特性进行分段研究和简化,最终得到了修正值(C)与环境光照度(E)之间的关系。基于此,设计了一种分区背光显示系统的自适应光晕抑制算法,并构建了基于U-Net的深度学习模型,与本文算法进行仿真对比。最后,在FPGA片上系统进行了算法的实现及技术指标测试。实验结果表明,虽然自适应算法的光晕控制效果整体略低于深度学习算法,但在识别速度上大幅领先,单位时间性能增益(PSNR/推理时间)达280 dB/s。这种“高亮稳、速度快”的特性,在车载导航、倒车影像等场景中更能保障用户视觉体验。

关键词: 自适应光晕抑制算法; 车载显示; Mini-LED; 光晕效应; FPGA

中图分类号: TN873; TN911 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2025-0115 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2025-0115

Research and design of an onboard zoned backlight display system based on an adaptive halo suppression algorithm

LU Jiale, SUI Jixiang*, HUANG Haibo, HU Rui, CAO Yuping, HU Ao

(School of Artificial Intelligence, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442000, China)

Abstract: Mini-LED local dimming liquid crystal display (LCD) systems have emerged as a primary development direction for in-vehicle HDR displays due to their exceptional local dimming capability and ultra-high contrast ratio. However, in complex driving scenarios such as rapid tunnel traversal and dynamic nighttime lighting, existing backlight extraction algorithms like fixed-weight coefficient error correction suffer from halo diffusion and nonlinear luminance distortion. This project conducted human visual perception experiments under varying ambient light conditions and illuminance levels. Two-factor ANOVA revealed that ambient light dominantly modulates halo perception. Based on Sigmoid and exponential decay functions, a halo index-ambient illuminance-luminance difference model was established, deriving the relationship between the halo index (H) and ambient illuminance (E). After segmental

收稿日期: 2025-06-04; 修订日期: 2025-07-25.

基金项目: 湖北省教育厅科技项目(No.B2023067); 湖北省自然科学基金(No.2025AFD237)

Supported by Science and Technology Project of Hubei Provincial Department of Education (No.B2023067);
Natural Science Foundation of Hubei Province (No.2025AFD237)

*通信联系人, E-mail: sui_jx@huat.edu.cn

analysis and simplification, the relationship between the correction value (C) and ambient illuminance (E) was obtained. Building on this, an adaptive halo suppression algorithm for partitioned backlight display systems was designed. A U-Net-based deep learning model was constructed for comparative simulation with the proposed algorithm. Finally, the algorithm was implemented and tested on an FPGA system-on-chip (SoC). Experimental results indicate that while the halo control performance of the adaptive algorithm is marginally inferior to the deep learning approach, it significantly outperforms in processing speed. The adaptive algorithm achieves a unit-time gain (PSNR/inference time) of 280 dB/s, fivefold higher than U-Net (56 dB/s). This “stable high brightness with rapid processing” characteristic ensures superior user visual experience in critical scenarios like in-vehicle navigation and rearview imaging.

Key words: adaptive halo suppression algorithm; in-vehicle display; Mini-LED; halo effect; FPGA

1 引言

随着汽车科技的飞速发展,车载显示系统在提升驾驶安全和乘车体验中扮演着日益重要的角色,而Mini-LED技术凭借高亮度、高对比度及成本优势正逐渐成为未来车载显示的发展方向^[1-2]。Mini-LED,是指尺寸小于0.2 mm的二极管,也就意味着与LCD相比,Mini-LED的面板灯会用更多的LED,能带来良好的宽色域性能、高对比度、高动态范围和局部调光功能,使用寿命也会比有机发光二极管(OLED)屏更长。Mini-LED技术将传统LCD的面光源改为分区控光的点光源,并采用更多的微型灯珠作为发光源,从而大幅提升显示的亮度 and 对比度。Mini-LED无论在峰值亮度还是对比度、色域范围等方面均表现出色。更重要的是,Mini-LED显示器的使用寿命长、成本低、耐热性强,将在未来车载显示系统中占据重要地位。

虽然Mini-LED已经开始市场化应用,但仍存在一些未解决的问题,极大地影响显示效果和用户体验,如光晕效应等。在屏幕显示及图像处理领域,光晕效应(Halo Effect)是一种因光学特性或算法处理导致的视觉失真现象,表现为高对比度区域边缘出现模糊的过渡光环或亮度扩散,本质是光线散射、信号处理误差或硬件限制对图像细节的干扰。采用多分区Mini-LED背光是一种提升液晶显示器对比度的技术,它将背光划分为一定数量的可独立控制的分区,通过局部调光方法,达到更高的亮度或者更黑的暗态。但某些黑白相切的场景,背光会出现不必要的光线扩散,无法准确表达黑色,在强烈的对比下针对形成光

晕效应。张跃渊等^[3]针对光晕效应影响因素提出了两种造成光晕效应的原因:一是局部调光单元的亮暗过渡,图像明暗边缘因调光分区切换产生亮度渐变,形成视觉光晕;二是背光块间光扩散,受LCD电子特性限制,单个Mini-LED背光块的光线会向相邻区域渗透,引发亮度不均与光晕叠加。但是,之前的研究只将目光聚焦于Mini-LED显示系统本身,常忽略了环境光对光晕效应的影响。

2 环境光照度对光晕效应的影响

为了探究环境光照度对Mini-LED背光显示光晕效应的影响,本研究参考文献[4]进行了主观性实验——人眼视觉感知实验。

本实验邀请了30位受试人员,按1:1男女性别比分为18~30岁、31~45岁、46~60岁3组,每组各10人,均满足视力 ≥ 1.0 且无色盲。为了探究不同环境光照度对Mini-LED背光显示光晕的影响,实验分别在 100 cd/m^2 、 500 cd/m^2 、 $1\,500\text{ cd/m}^2$ 下设置了6个等级的环境光照度,分别为 $<1\text{ lx}$ (隧道/夜间)、 50 lx 、 150 lx 、 300 lx 、 500 lx 和 750 lx ,进而探究环境光、屏幕亮度对产生光晕效应的影响。然后让30人在不同条件下依次观看同一块Mini-LED显示屏,并且播放同一段高动态画面,每个人对光晕效应的感知进行打分(分数越高表示光晕效应越强,以下简称光晕评分),最高分为5分。根据所有人的光晕评分数据,制成不同屏幕亮度、不同环境光照度下的光晕评分箱线图,并进行两因素方差分析。

图1中3张箱线图围绕 100 cd/m^2 、 $1\,000\text{ cd/m}^2$ 、 $1\,500\text{ cd/m}^2$ 三种屏幕亮度,探究环境光照度

($<1\sim750\text{ lx}$)对光晕评分的影响,得出“低光照度下评分快速增长,高光照度下评分趋近饱和”的非线性规律。在 $\leq 500\text{ lx}$ 低环境光阶段,无论屏幕亮度如何,光晕评分随环境光增强快速攀

升,箱体离散度扩大,体现了低光照度下光晕感知对环境光变化的高敏感性;当环境光 $\geq 500\text{ lx}$,评分增速骤降,箱体压缩、上沿逼近满分,凸显 500 lx 是感知饱和拐点。

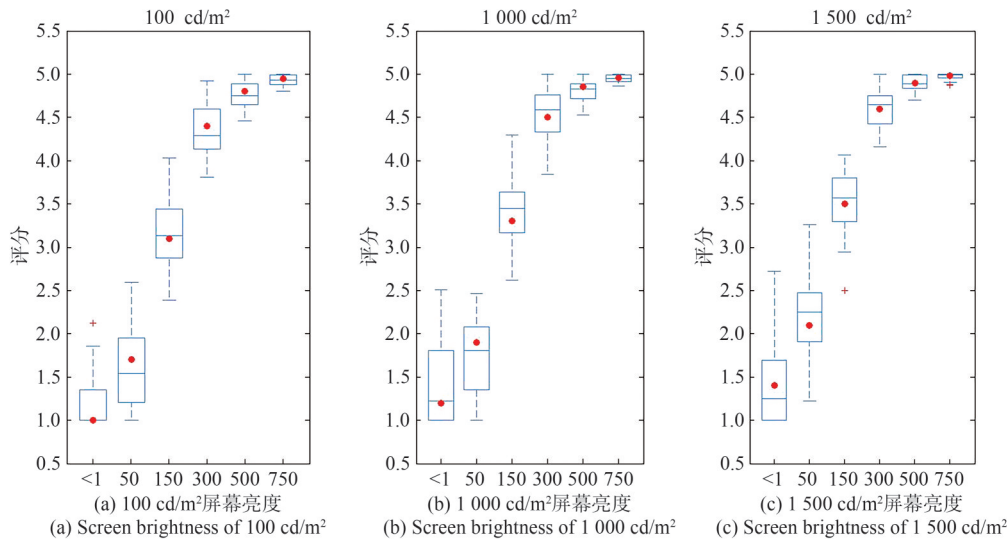


图1 不同屏幕亮度下的光晕评分分布

Fig. 1 Distribution of halo perception scores under different screen luminance levels

参考文献[5-6]中采用两因素方差分析对实验数据进行分析并创建表1。实验数据中观察到变异来源中,环境光照度的平方和为540.5、自由度为5、 η^2 达86.4%、 F 值为1 743.55,是光晕感知的绝对主导因素。屏幕亮度的 η^2 仅为8.1%,效应远弱于环境光照度的影响;交互作用的 η^2 为0.32%,影响极微。

本实验围绕 Mini-LED 背光光晕效应,招募30名受试者,设置不同屏幕亮度及环境光照度,对光晕效应的感知进行打分。经主观评分箱线图与两因素ANOVA分析,得出不同屏幕亮度下光晕评分都遵循“快速增强 $\rightarrow$ 饱和”的非线性规律,且环境光照度的效应量远高于屏幕亮度效应量,表明环境光照度对光晕效应的影响远强于屏幕亮度。

表1 两因素ANOVA结果

Tab. 1 Results of two-factor ANOVA

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	$\eta^2/\%$
环境光照度	540.5	5	108.1	1 743.55	<0.001	86.4
屏幕亮度	50.7	2	25.35	408.87	<0.001	8.1
交互作用	2.0	10	0.2	3.23	0.000 3	0.32
误差	32.4	522	0.062	—	—	—
总计	625.6	539	—	—	—	100

3 传统背光提取算法分析

首先对目前使用较为广泛的 Mini-LED 背光亮度提取算法进行分析,对多种传统算法进行仿真。图2分别为测试原图、原始灰度图、以及通过

平均值亮度提取算法、最大值亮度提取算法、均方根亮度提取算法、误差修正亮度提取算法所获得的灰度图,最大值法虽能保留高光细节,但易导致局部过曝和功耗浪费;平均值法虽均衡全局亮度,却可能削弱高对比度场景的层次感的问

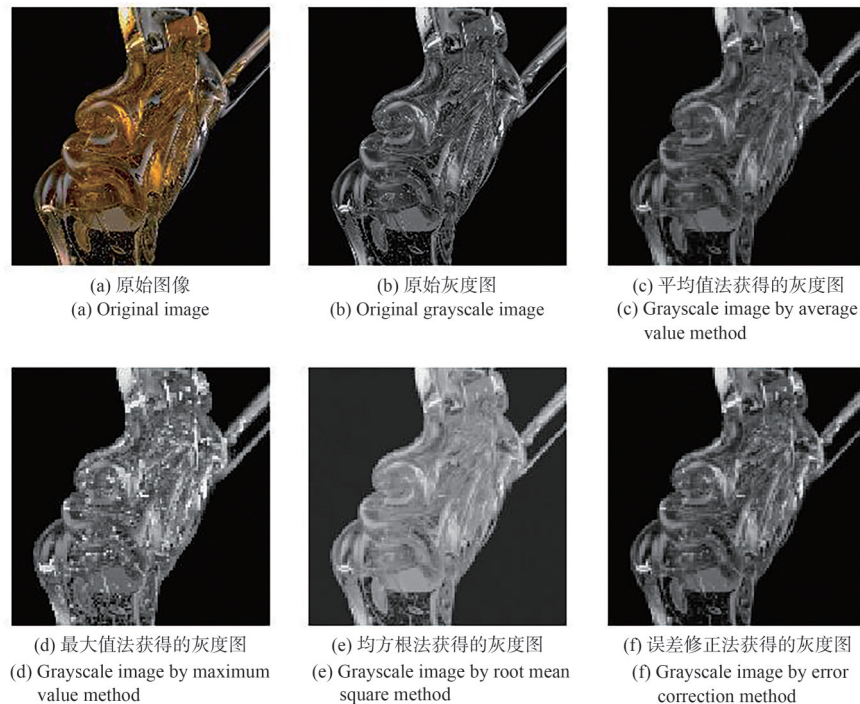


图2 传统背光提取算法的灰度仿真图

Fig. 2 Grayscale simulation diagram of the traditional backlight extraction algorithm

题,细节展示不够完善,均方根法虽能反映亮度分布特性,但对复杂动态场景的适应性不足,误差修正法通过引入迭代反馈或预测补偿机制,实时分析背光驱动信号与实际显示画面的差异,动态修正亮度权重,在显示效果方面较为出色。

误差修正法相较于最大值法、平均值法、标准差法及均方根法,其核心优势在于通过动态反馈机制实现更精准的亮度映射与场景适配。而本实验为降低不同环境光照度下光晕效应对显示效果的影响,需要背光提取算法有良好的动态反馈机制,误差修正法满足这一基本要求,但其修正值前的加权系数固定,并不能对光晕效应的减缓起到最大作用。

图3、图4为传统背光提取算法的SSIM、DEI指标对比(SSIM侧重全局视觉保真度,DEI聚焦局部动态误差)。在Mini-LED分区背光亮度提取算法中,误差修正法和平均值法相较于最大值法及均方根法在显示效果以及均衡全局亮度方面较为出色。误差修正法的核心优势在于通过动态反馈机制实现更精准的亮度映射与场景适配,这与本研究中探讨自适应环境光抑制的观点相契合,所以本研究将基于误差修正的背光亮度提取算法进行优化与创新。

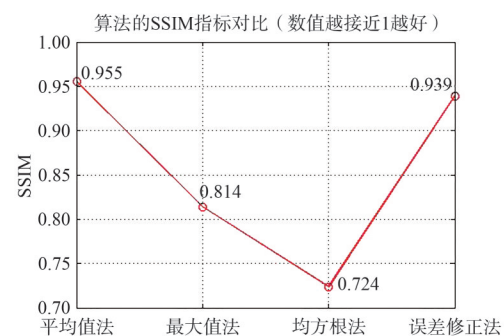


图3 传统背光提取算法的SSIM指标图

Fig. 3 SSIM index diagram of the traditional backlight extraction algorithms

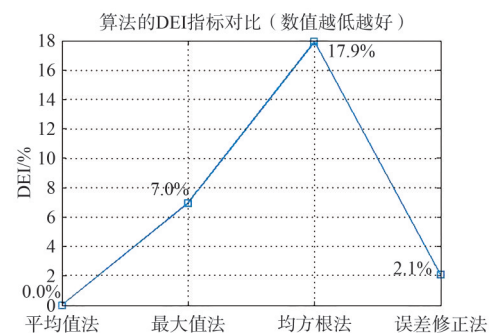


图4 传统背光提取算法的DEI指标图

Fig. 4 DEI index diagram of the traditional backlight extraction algorithms

误差修正背光亮度提取算法首先获取背光区域的亮度最大值 $B_{\max}$ 和平均值 B_{avg} , 两者做差得到变量 D , 根据该变量计算得到修正值 N , 最后将平均值 B_{avg} 和修正值 N 的和作为背光亮度值。

$$D = B_{\max} - B_{\text{avg}}, \quad (1)$$

$$N = \frac{1}{2} \left(D + \frac{D^2}{256} \right), \quad (2)$$

$$B_{\text{diff}} = B_{\text{avg}} + N, \quad (3)$$

式(1)中, D 为各图像分区中灰度最大值和灰度均值的差值; 式(2)中, N 为利用灰度最大值和灰度均值量化得到的修正值; 式(3)中, B_{diff} 为利用误差修正法得到的子区域的特征亮度值。

4 自适应光晕抑制算法的设计与仿真

4.1 算法设计

参考人眼视觉感知实验以及相关研究^[7-8], 深入分析光晕效应的特点, 本研究基于改进的 CIE CDR (Contrast Discomfort Rating) 模型, 使用 Sigmoid 函数和指数衰减函数组合, 模拟光晕效应随环境照度和亮度差值的变化, 如公式(4)所示:

$$H = \frac{1}{1 + e^{-0.01(E-200)}} \times (1 - e^{-0.05D'}), \quad (4)$$

其中: H (Halo) 为光晕指数, E 为环境照度, D' 为任一子区的平均亮度与其周围 8 个方向子区平均亮度之差的平均值。

然后构建环境照度 E 、亮度差值 D' 以及光晕指数 H (光晕指数是用于量化评估光晕效应程度的指标) 的三维曲面模型 (图 5), 并拟合特征亮度差 DIFF ($D'=100$) 下环境光照度 E 与光晕指数, H (Halo) 的关系曲线 (图 6)。

由图 6 仿真结果得到了环境光照度 E 与光晕指数, H 的关系, 进而构建环境光照度 E 、亮度差值 D' 以及修正值 C 的三维曲面模型 (图 7), 并拟合特征亮度差 DIFF ($D'=100$) 下修正值 C 与环境光照度 E 的曲线图并对曲线进行分段研究 (图 8), 得出 C 与 E 的关系。

暗室敏感区 ($E < 100$):

$$C = 0.6D' \times (1 + 0.005E). \quad (5)$$

对数增长区 ($100 < E < 500$):

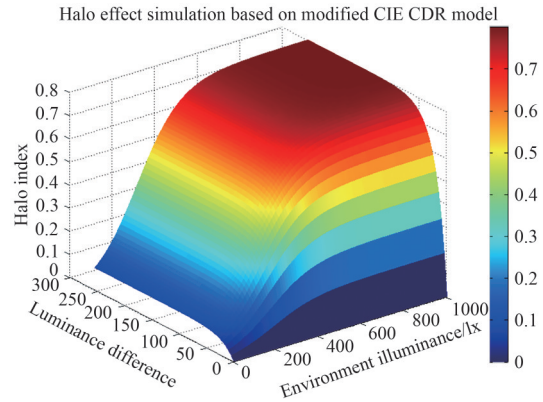


图 5 E - D' - H 的三维曲面图

Fig. 5 3D surface plot of E - D' - H relationship

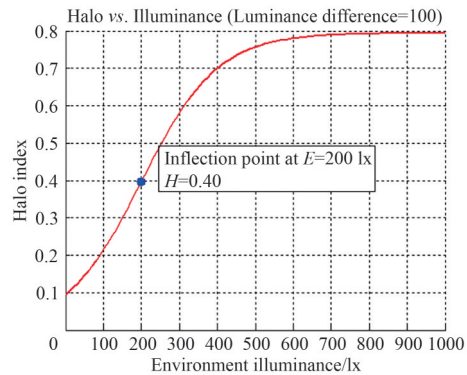


图 6 特征亮度差下 E - H 关系图

Fig. 6 Diagram of E - H correlation under characteristic brightness differences

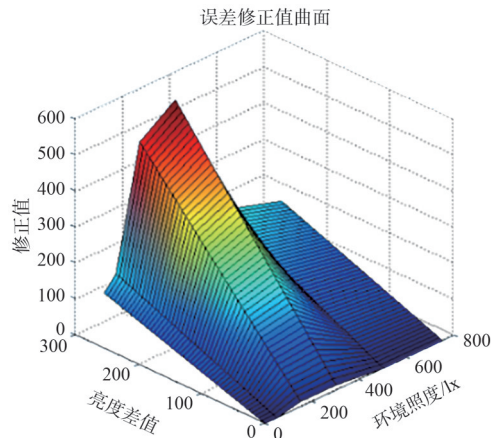


图 7 E - D' - C 的三维曲面图

Fig. 7 3D surface plot of E - D' - C relationship

$$C = 0.4D' \times \ln E + 15. \quad (6)$$

环境光抑制效应 ($E > 500$):

$$C = 0.3D' \times \left(1 + \frac{1000}{E} \right), \quad (7)$$

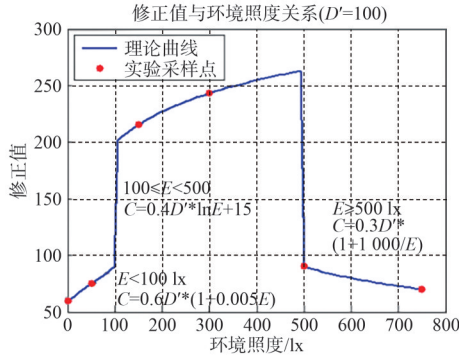


图 8 特征亮度差下 E-C 关系图

Fig. 8 E-C correlation diagram under characteristic brightness differences

综上,本研究在误差修正法的基础上,引入环境光影响因子,首先建立了新型 CIE CDR 模型,得到了环境光 E 与光晕指数 H 的关系,然后验证了环境光照度 E 与光晕指数 H 的关系,最后拟合出修正值 C 与光照度 E 的关系,并采用分段研究思想,研究了 3 种状态下环境光照度 E 与 C 之间的关系,并设计了新型环境光自适应光晕抑制算法。

局部亮度差异计算:

$$D' = \frac{1}{8} \sum_{(m,n) \in \Omega} |L_{\text{avg}(i,j)} - L_{\text{avg}(m,n)}|, \quad (8)$$

$$\Omega = \left\{ \begin{array}{l} (i-1, j-1), (i-1, j), \\ (i-1, j+1), (i, j-1), \\ (i, j+1), (i+1, j-1), \\ (i+1, j), (i+1, j+1) \end{array} \right\}. \quad (9)$$

修正值自适应计算:

$$C = \begin{cases} 0.4D' \times \ln E + 15, & E < 100 \\ 0.6D' \times (1 + 0.005E), & 100 \leq E < 500 \\ 0.3D' \times \left(1 + \frac{1000}{E}\right), & 500 \leq E \end{cases}. \quad (10)$$

子区特征亮度计算:

$$B = B_{\text{avg}} + C, \quad (11)$$

其中: E 为环境光照度, D' 为任一子区的平均亮度与其周围 8 个方向子区平均亮度之差的平均值, B_{avg} 为任一子区亮度平均值, C 为修正值, B 为最终特征亮度值^[9-14]。

4.2 算法仿真

为验证自适应光晕抑制算法的可行性及优势,在 MATLAB 环境中进行仿真,并与 U-Net 深度

学习算法进行对比^[15-17]。在 <1 lx (隧道/夜间)、50 lx、100 lx、150 lx、200 lx、300 lx、500 lx、800 lx 和 1 000 lx 等不同环境光照度下使用 90 张图进行算法测试,分别计算自适应算法与深度学习算法在不同环境光照度下的平均光晕指数、峰值信噪比 (PSNR) 性能指标以及单位时间性能增益。

图 9 为两种算法光晕指数与环境光照度的关系曲线。从全光照区间的综合表现来看,深度学习算法的光晕控制效果整体略优于自适应算法,但在 650~1 000 lx 强光区间,其光晕指数高于自适应算法。同时,两种算法在各环境光照度下的光晕指数均处于较低水平,表明二者的光晕抑制能力都较为优秀。

图 10 为自适应算法与深度学习算法的精度-速度权衡特性分析图,其中蓝色的 90 个点表示自适应算法的测试结果,蓝色五星为其特征值;橙

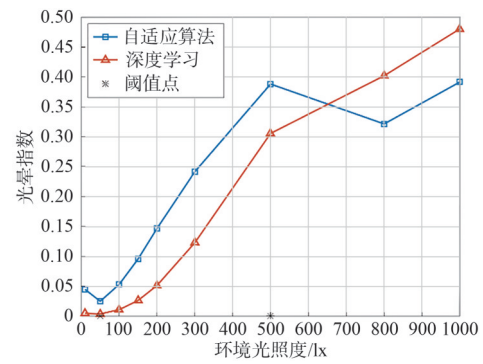


图 9 自适应算法与深度学习算法的光晕指数随环境光照度变化对比

Fig. 9 Comparison of halo index variation with ambient illuminance between adaptive algorithm and deep learning algorithm

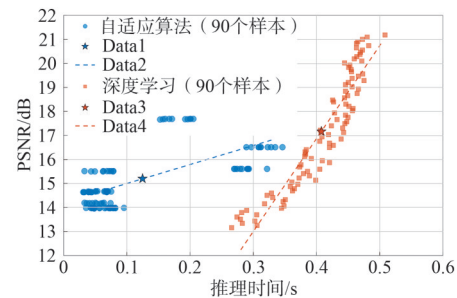


图 10 自适应算法与深度学习算法的精度-速度权衡特性分析

Fig. 10 Analysis of accuracy-speed trade-off characteristics between adaptive algorithm and deep learning algorithm

色的 90 个点表示深度学习算法的测试结果,橙色五星为其特征值。自适应算法的 PSNR 值略低于深度学习算法,但是推理速度大幅度领先。这种“高亮稳、速度快”的特性,在车载导航、视频播放等场景中更能保障用户视觉体验。

图 11 为两种算法的 PSNR 性能与单位时间性能增益对比。深度学习算法的 PSNR 分布离

散度大。自适应算法的 PSNR 分布集中,自适应调光能力使其在 90 张测试图中保持稳定输出。在单位时间性能增益方面,自适应算法的特征值达 280 dB/s,是深度学习算法(56 dB/s)的 5 倍,体现了“速度-精度”的高效平衡。在车载动态显示场景(如倒车影像)中,这种稳定性与效率更贴合车载显示的核心需求。

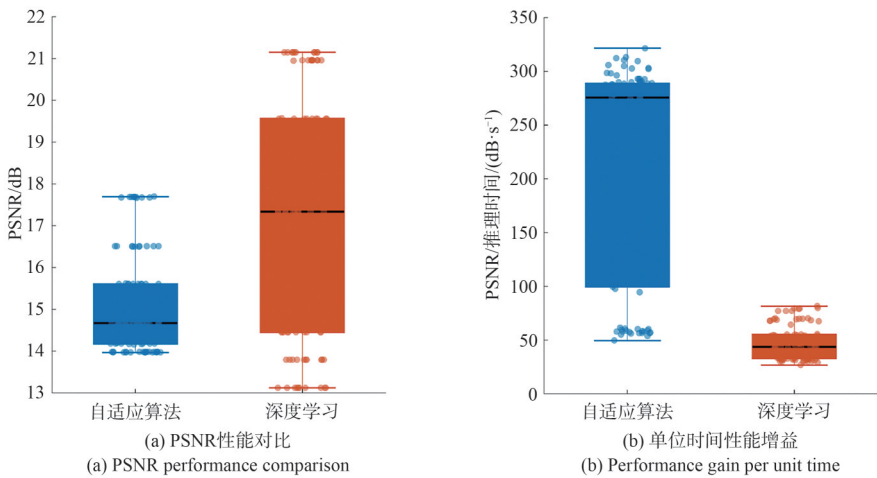


图 11 两种算法 PSNR 性能与单位时间性能增益对比

Fig. 11 Comparison of PSNR performance and unit-time gain between two algorithms

5 基于FPGA的算法实现及测试

5.1 硬件电路设计

图 12 为本研究设计的 FPGA 实物图,左半部分主要为液晶驱动模块,其主要工作是对 HDMI

信号的解析;右半部分主要为 LVDS 接口设计、背光板接口设计以及 FPGA 芯片。

液晶屏幕采用的是 10.1 in(1 in=2.54 cm) 1 280×800 分辨率的液晶屏幕,灯板将液晶屏幕的显示区域等比划分为 360 个区块,每个区块对应

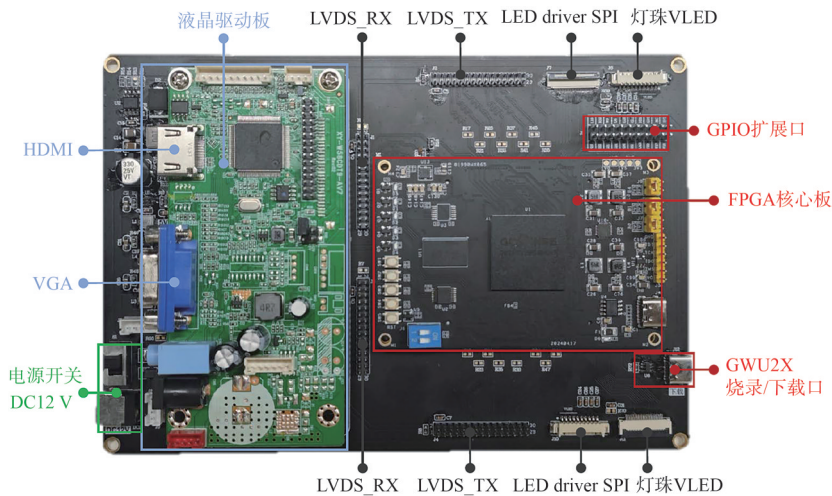


图 12 FPGA 实物图

Fig. 12 FPGA physical implementation

一颗 LED 灯珠。Mini-LED 驱动采用的 IC 控制芯片(ICND7001)为 48 路脉冲宽度调制(PWM)恒流输出,于是设计时采用了通道复用的方式将

4 个 LED 灯珠并联使用,实现 360 个灯珠的精确控制。图 13、14 分别为 LED 驱动电路的微观、宏观原理图^[18-19]。

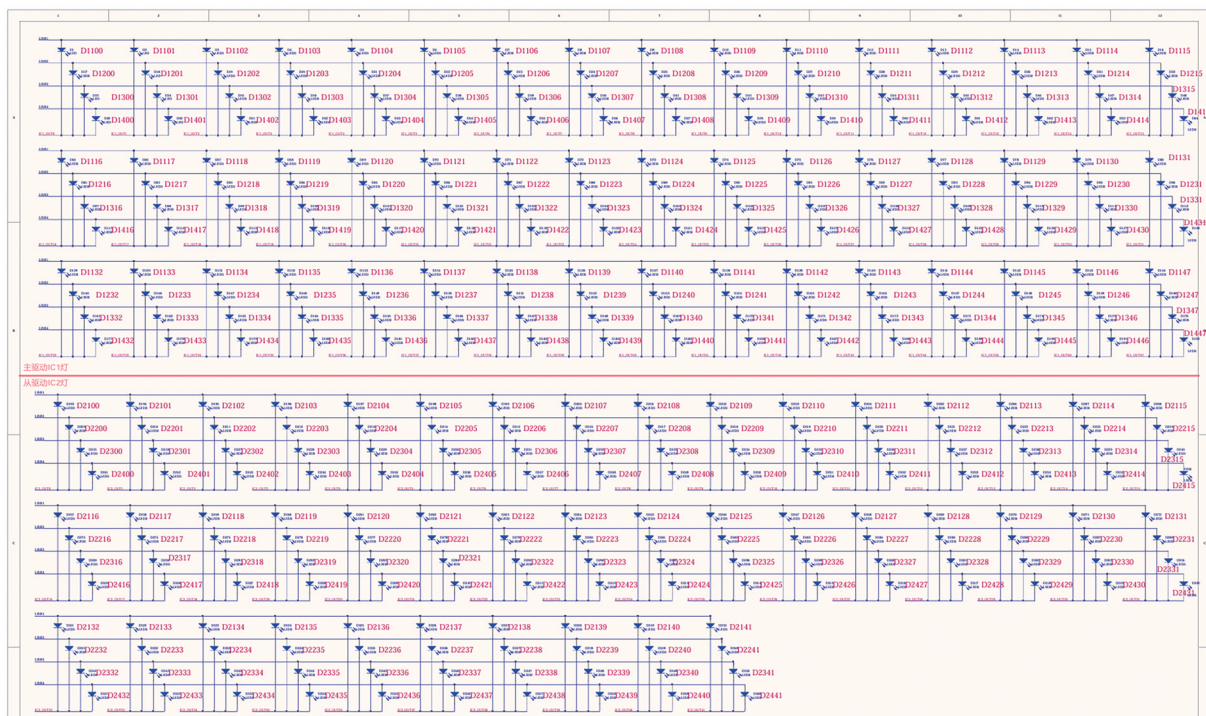


图 13 LED 阵列的宏观线路图

Fig. 13 Macroscopic circuit diagram of the LED array

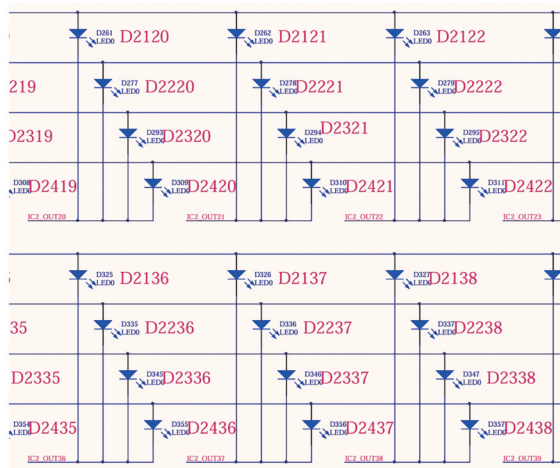


图 14 LED 阵列的微观线路图

Fig. 14 Microscopic circuit diagram of the LED array

5.2 FPGA 系统设计

图 15 为 FPGA 系统设计框图。外部视频源通过 HDMI 接口将图像数据流输入 HDMI 驱动板,将输出信号接入 LVDS_RX 模块,再通过

LVDS_TX 接到液晶显示屏。LVDS_RX 模块输出的 RGB 分量同时输入到图像预处理模块,再将灰度值输入到背光亮度提取模块。在背光提取模块中,计算每个子区域的亮度平均值,将该值与周围 8 个方向子区域的亮度平均值作差,并求取这些差值的平均值 D 。将 D 与外部环境光传感器采集的光照度 E 进行加权计算得到修正值 C ,将 C 与该区域的亮度平均值相加得到背光亮度特征值。最后通过 FIFO 存储器将所得 360 个数据以及地址以 25M 的时域输出到数据拼接时序控制模块,Mini-LED 驱动模块驱动 LED 实现背光板动态调光^[20-22]。

图 16 为 FIFO 写入模块的时序设计图。RGB_Clk 为 LVDS 接口时钟。当 360 个特征亮度值计算完成后,DATA_done 信号被拉高,FIFO 写入使能信号(WR_en)被置为高电平,随后特征亮度数据 Data_eig 按照时钟节拍依次写入并暂存到 FIFO 存储器中。图 17 为 FIFO 读取模块的

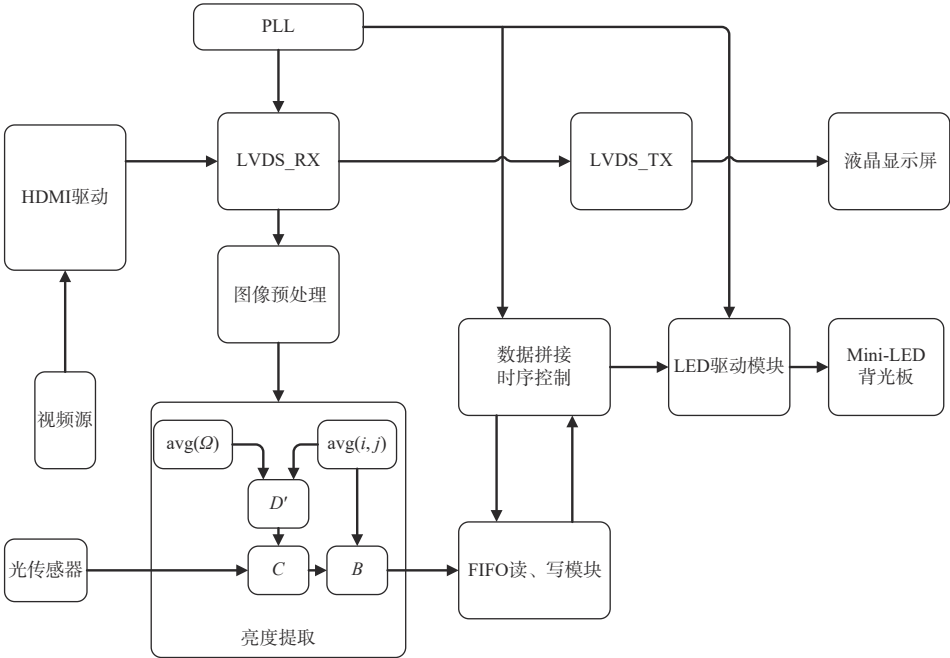


图 15 FPGA 系统设计框图
Fig. 15 Block diagram of FPGA system design

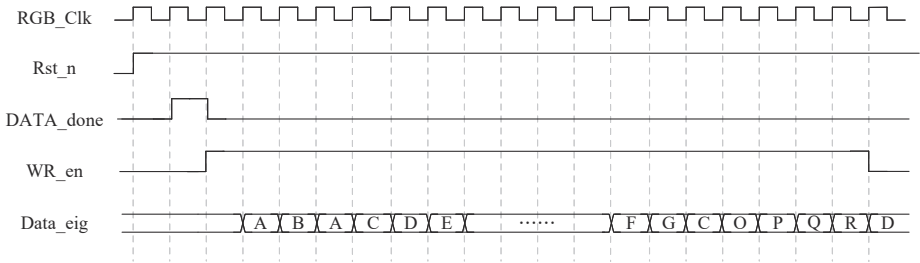


图 16 FIFO 写入时序控制
Fig. 16 FIFO write timing control

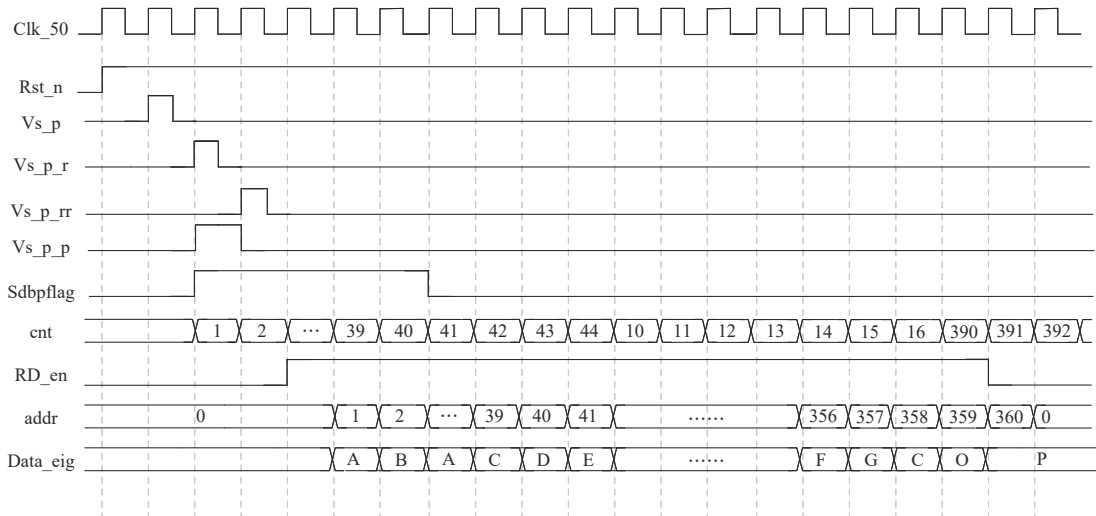


图 17 FIFO 读取时序控制
Fig. 17 FIFO read timing control

时序图。当场同步信号到来时,先对 V_{s_p} 进行打拍,然后实现 $V_{s_p_rr}$ 的时域转换,产生 $V_{s_p_p}$ 信号。此时拉高 $S_{dbpflag}$ 并触发计数器,当计数到 39 时拉高读取使能信号,亮度数据和地址被传入到背光驱动模块,实现动态调光。

5.3 系统测试

图 18 为实验设计的实物图,上半部分为液晶显示屏和背光板,下半部分为 FPGA 板卡。通过该设备完成本研究背光显示系统自适应光晕抑制算法的实现。

图 19 为使用夜间行车图片模拟电子后视镜



图 18 系统实物图

Fig. 18 System physical prototype



图 19 效果展示图

Fig. 19 Effect demonstration

夜间行车的图像内容。将 Mini-LED 处于昏暗状态,显示屏图像的左半部分为传统误差修正法进行的亮度提取,明显存在光晕效应且噪点多;右半部分加入了环境光影响因子,显示效果显然更加优秀,图像对比度更高,细节表现更加出色。

表 2 为 FPGA 资源使用量化表,Mini-LED 背光亮度提取需实时处理多分区亮度数据,表 2 中 DSP 单元(2 个 MULT9X9、2 个 MULTADALU18X18)的配置直接支撑算法中的乘加运算,如亮度均值计算、动态调节系数的运算等,13% 的利用率表明硬件可并行处理更多分区的亮度数据;同时,PRIMARY 时钟、rPLL 等时钟资源的高效使用,保障了算法在高频时钟下快速刷新背光亮度。

表 2 FPGA 资源使用量化表

Tab. 2 Quantified FPGA resource utilization

具体指标	使用量/详情	总量	利用率/%
Logic	5 546(含 3 350 LUT/ALU、366 SSRAM)	54 720	11
Register	1 605	42 000	4
CLS	3 377	27 360	13
I/O Port	42	320	13
DSP	2 MULT9X9、2 MULTADALU18X18	—	13
PRIMARY 时钟	7	8	88
rPLL	3	6	50
LW 时钟	6	8	75

6 结 论

Mini-LED 分区背光液晶显示系统因卓越的局部调光能力和高对比度成为车载 HDR 显示器的重要发展方向,但现有算法在隧道穿越、夜间

灯光多变等复杂场景中存在光晕扩散与亮度非线性失真问题。本研究通过不同环境光和光照度下的人眼视觉感知实验,结合双因素方差分析明确环境光对光晕感知的调控主导性。基于 Sigmoid 函数和指数衰减函数构建光晕指数-环

境光照度-亮度差值模型,分段研究并简化得到修正值与环境光照度的关系,进而提出自适应光晕抑制算法,并与U-Net深度学习算法对比,且在FPGA上完成算法的实现与测试。结果显示,自适应算法识别速度显著占优,单位时间增益

(280 dB/s)为U-Net(56 dB/s)的5倍,其“高亮稳、速度快”的特性更适配倒车影像等场景,能有效保障用户的视觉体验。本研究为解决Mini-LED背光光晕问题提供了有效方案,助力Mini-LED技术在车载显示领域的进一步发展。

参考文献:

- [1] 王伟,赵甜甜,刘强,等. Mini/Micro LED巨量转移技术研究与发展现状[J]. 光学精密工程, 2023, 31(2): 183-199.
WANG W, ZHAO T T, LIU Q, *et al.* Research and development status of mini/micro LED mass transfer technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(2): 183-199. (in Chinese)
- [2] 李香兰,金霞,吕金光,等. Micro LED车灯投影光学系统设计与优化[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(1): 89-99.
LI X L, JIN X, LÜ J G, *et al.* Design and optimization of Micro LED vehicle light projection optical system [J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 89-99. (in Chinese)
- [3] 张跃渊,夏振平,宋玉,等. 基于视觉感知的Mini-LED背光LCD中的光晕效应[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(12): 1211004.
ZHANG Y Y, XIA Z P, SONG Y, *et al.* Halo effect of mini-light-emitting diode backlight liquid-crystal display based on visual perception [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(12): 1211004. (in Chinese)
- [4] 李超超,夏振平,张跃渊,等. 环境光对Mini-LED背光LCD光晕感知的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(12): 1211008.
LI C C, XIA Z P, ZHANG Y Y, *et al.* Effect of ambient light on halo perception of liquid crystal displays with mini-LED backlight [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(12): 1211008. (in Chinese)
- [5] OPIĆ S. Factorial designs Analysis of variance (ANOVA) in types sum of squares 1, 2, 3 (type one SS, type two SS, type three SS) in unbalanced designs-principle of marginality [J]. *Radovi Zavoda za Znanstvenoistraživački i Umjetnički Rad u Bjelovaru*, 2023(17): 105-118.
- [6] WILCOX R R. Two-way ANOVA: inferences about interactions based on robust measures of effect size [J]. *The British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 2022, 75(1): 46-58.
- [7] 吴超,邱国平,余新,等. 基于区域调光的高动态范围激光显示[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(23): 2312003.
WU C, QIU G P, YU X, *et al.* High dynamic range laser display based on local dimming [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(23): 2312003. (in Chinese)
- [8] 张涛,胡孟阳,杜文丽,等. 一种新型可调节的自适应区域调光方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(12): 121017.
ZHANG T, HU M Y, DU W L, *et al.* Adjustable adaptive local dimming method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(12): 121017. (in Chinese)
- [9] 郭举,申琼鑫,江宗钊,等. Mini-LED背光区域调光单元的光学特性研究[J]. 液晶与显示, 2021, 36(7): 939-946.
GUO J, SHEN Q X, JIANG Z Z, *et al.* Optical performance of local dimming backlight unit based on Mini-LED sources [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(7): 939-946. (in Chinese)
- [10] 杨梅慧,林伟瀚,于海,等. Mini LED显示光学性能分析[J]. 液晶与显示, 2022, 37(6): 680-686.
YANG M H, LIN W H, YU H, *et al.* Optical performance analysis of Mini LED display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(6): 680-686. (in Chinese)
- [11] 冯艳丽,黄卫东,邱国峰,等. Mini-LED背光液晶显示器光晕测量方法[J]. 信息技术与标准化, 2023(11): 20-24.
FENG Y L, HUANG W D, KUANG G F, *et al.* Measurement method for halo effect of the liquid crystal display with mini-LED backlight unit [J]. *Information Technology & Standardization*, 2023(11): 20-24. (in Chinese)
- [12] 陈丽,郭玉坤,李金屏. 一种基于Sigmoid函数的抑制Halo效应的有效算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(11): 112-117.
CHEN L, GUO Y K, LI J P. Effective algorithm to inhibit halo effect based on sigmoid function [J]. *Computer Science*, 2015, 42(11): 112-117. (in Chinese)
- [13] LIU L, ZHANG M C, CHEN Y S. Application of mini LED halo control in the field of vehicular display [J].

- International Journal of High Speed Electronics and Systems*, doi: 10.1142/S0129156425404437.
- [14] HE N L, ZHANG Y N, HU C H, *et al.* Analysis of halo improvement factors of mini-LED backlit display based on visual sensitivity [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2024, 55(S1): 302-305.
- [15] 赵天元,董登峰,王国名,等. Micro LED表面缺陷的快速高精度检测[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(9): 1434-1445. ZHAO T Y, DONG D F, WANG G M, *et al.* Rapid and high-precision detection on surface defects of micro LED [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(9): 1434-1445. (in Chinese)
- [16] 段绿茵. 基于区域调光算法的高动态范围和宽色域显示技术的研究[D]. 天津:天津大学, 2020. DUAN L Y. HDR and WCG display technologies based on local dimming algorithms [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. (in Chinese)
- [17] ZOU G W, WANG Z Y, YANG W C, *et al.* Deep learning-enabled image content adaptive driving algorithm for field sequential color LCDs with mini-LED backlight [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2022, 53(1): 857-860.
- [18] WANG X Y, LU Z Y, KUANG G F, *et al.* Halo effect measurement for mini-LED backlight liquid crystal displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2023, 54(S1): 365-370.
- [19] 张昕,吴佩雯,肖书平,等. 显示驱动芯片原理及发展现状[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(11): 1156-1167. ZHANG X, WU P W, XIAO S P, *et al.* Principle and development status of display driver chips [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(11): 1156-1167. (in Chinese)
- [20] 周律,郑华,张声浩,等. Micro-LED显示及其驱动技术的研究进展[J]. *液晶与显示*, 2022, 37(11): 1395-1410. ZHOU L, ZHENG H, ZHANG S H, *et al.* Research progress of micro-LED display and its driving technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(11): 1395-1410. (in Chinese)
- [21] 乔锐,翟成瑞,张彦军. 一种LVDS高速数据传输电路[J]. *电子器件*, 2021, 44(2): 312-315. QIAO R, ZHAI C R, ZHANG Y J. High-speed, high-reliability data transmission storage device based on LVDS [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2021, 44(2): 312-315. (in Chinese)
- [22] 刘杰,程松华,张永栋,等. 基于Mini-LVDS技术的TFT-LCD时序控制器的设计[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(2): 238-244. LIU J, CHENG S H, ZHANG Y D, *et al.* Design of TFT-LCD timing controller based on mini-LVDS technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(2): 238-244. (in Chinese)

作者简介:



路家乐,男,大学本科在读,主要从事车载液晶显示技术的研究。E-mail: 202202197@huat.edu.cn



隋纪祥,男,硕士,讲师,2016年于湖北大学获得硕士学位,主要从事汽车电子方面的研究。E-mail: sui_jx@huat.edu.cn