

基于凸优化与 DE2000 色差的 LED 高保真色域转换模型

谢佳乐, 周 勇*

巢湖学院数学与大数据学院 安徽合肥

【摘要】针对 LED 显示中广色域视频源到有限色域 RGB 屏的转换失真及多基色系统转换中的欠定与非负约束矛盾, 提出基于 CIE ΔE_{00} 色差优化的色域转换模型。广色域映射采用“线性转换-凸约束-局部优化”模型, 将 BT.2020 转换至 CIE-XYZ 后, 对超色域点沿亮度轴投影并在凸约束下优化色差; 多基色转换设计“非负最小二乘+凸色域投影”算法, 确保物理可行并优化域外解。在基于 BT.2020 色域内 10,000 个均匀采样点的测试中, 本文模型在 Intel i7-12700 单线程环境下, 相较于传统的线性变换加最近点投影方法, 成功将平均 ΔE_{00} 色差从 5.82 降至 3.24 (降低了 44.3%), 同时每批处理 1000 个颜色点仅耗时 35.2ms。对于多基色转换, RGBV→RGBCX 转换实现了 95.6% 的点位于目标色域内 (平均色差 3.05)。该模型为 LED 显示高保真色域转换提供了有效框架。

【关键词】色域映射; CIE ΔE_{00} ; 多基色显示; 非负最小二乘; 凸优化; LED 显示屏

【基金项目】本研究得到了巢湖学院质量工程 (编号: XLY202403) 和横向课题 (编号: hxkt20250132) 的资助

【收稿日期】2025 年 5 月 14 日 **【出刊日期】**2025 年 6 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.aam.20250016

An LED high-fidelity color gamut conversion model based on convex optimization and DE2000 chromatic aberration

Jiale Xie, Yong Zhou*

School of Mathematics and Big Data, Chaohu University, Hefei, Anhui

【Abstract】To address distortion in converting wide-gamut video sources to limited-color-range RGB screens and the inherent trade-off between underdetermination and non-negativity constraints in multi-primary color system conversion, we propose a gamut conversion model optimized for chromatic aberration using CIE ΔE_{00} . The wide-gamut mapping employs a "linear transformation-constrained convex optimization" framework: after converting BT.2020 to CIE-XYZ, chromatic aberration is minimized along the brightness axis under convex constraints for over-gamut points. For multi-primary conversion, we implement an algorithm combining "non-negativity minimization with convex chromatic projection" to ensure physical feasibility while optimizing solutions beyond the target gamut. In tests using 10,000 evenly sampled points within BT.2020's gamut, our model achieves a 44.3% reduction in average chromatic aberration (from 5.82 to 3.24) under Intel i7-12700 single-threaded processing, with computation time reduced to 35.2ms per batch of 1000 color points. For RGBV→RGBCX conversion, 95.6% of transformed points remain within the target gamut (average chromatic aberration 3.05). This model provides an effective framework for high-fidelity gamut conversion in LED displays.

【Keywords】Color gamut mapping; CIE ΔE_{00} ; Multi-primary display; Non-negative least squares; Convex optimization; LED display

*通讯作者: 周勇

RGGB 四基色系统虽实现 BT.2020 标准 97.51% 的色域覆盖, 但绿色区域仍需 9.58% 的增强。LED 显示技术中, 颜色复现的准确性与一致性是核心挑战。一方面, BT.2020 广色域视频源与普通 RGB 显示屏的色域差异导致色彩损失; 另一方面, 多基色系统 (如四基色信号到五基色显示屏) 的转换存在欠定方程与非负物理约束的矛盾。现有方法存在色差大、色域外点比例高的问题, 难以满足人眼感知一致性要求^[1]。

本研究提出融合 CIE ΔE_{00} 色差标准与凸约束优化的解决方案: 假设颜色转换可通过线性矩阵描述, 目标色域为凸多边形, 超色域点通过最小化 ΔE_{00} 色差投影至边界, 且保持亮度不变。CIE ΔE_{00} 色差公式结合迭代优化算法, 可解决环境光谱差异导致的颜色漂移问题, 保障颜色恒常性。该模型兼顾理论严谨性与工程实用性, 为高保真色域转换提供新方法^[2]。

1 从 BT.2020 到普通 RGB 的颜色空间转换

1.1 颜色空间基础与转换原理

BT.2020 色域面积 (0.070CIE1931xy 单位) 是 sRGB (0.036) 的 1.94 倍。通过蒙特卡洛方法在 BT.2020 色域内进行 10, 000 次均匀采样, 统计结果显示有 49.8% 的颜色点位于 sRGB 色域之外, 因此约半数颜色需要进行色域映射处理才能在普通 RGB 屏显示 (表 1)。CIE $L^*a^*b^*$ 空间因感知均匀性成为色差评价基础, 其与 CIEXYZ 的转换关系为:

$$\begin{cases} L^* = 116(Y/Y_n) - 16 \\ a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \\ b^* = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \end{cases}$$

其中 $f(t) = t^{1/3} (t > 0.008856)$, X_n, Y_n, Z_n 为标准白点三刺激值。

表 1 不同色域的 CIE1931xy 平面参数

色域标准	色域面积	相对 sRGB 覆盖率
sRGB	0.036	100%
BT.2020	0.07	194%

色域转换通过线性矩阵实现: 设源色域基色坐标矩阵为 M_S , 目标色域为 M_T , 转换矩阵 $T = M_T M_S^{-1}$ 。以 BT.2020 转 sRGB 为例, 代入基色坐标 (表 2) 得核心转换矩阵:

$$T = \begin{bmatrix} 0.6370 & 0.1446 & 0.1689 \\ 0.2627 & 0.6780 & 0.0593 \\ 0.0000 & 0.0281 & 1.0610 \end{bmatrix}$$

表 2 BT.2020 与 sRGB 基色的 CIE1931xy 色度坐标 (并列出 $z=1-x-y$)

色域	基色	x	y	z
BT.2020	R	0.708	0.292	0
	G	0.17	0.797	0.033
	B	0.131	0.046	0.823
sRGB	R	0.64	0.33	0.03
	G	0.3	0.6	0.1
	B	0.15	0.06	0.79

1.2 模型构建: 线性转换+凸约束+CIE 色差优化

凸包算法界定设备色域边界, 结合非线性亮度均衡优化, 可使六基色 LED 显示的亮度离散系数降至 0.1685^[3]。

目标色域 sRGB 作为凸集需满足:

(1) 非负约束: $R, G, B \in [0, 255]$, 确保物理可显示;

(2) 色域边界约束: 颜色点需位于 sRGB 三角形内, 满足 6 个不等式约束 (如红色边约束 $0.1803 - 0.5814 \leq 0$)。

CIE ΔE_{00} 色差公式用于量化感知差异:

$\Delta E_{00} = \sqrt{(\Delta L' / k_L S_L)^2 + (\Delta C' / k_C S_C)^2 + (\Delta H' / k_H S_H)^2} R_T$ 其中 $\Delta L', \Delta C', \Delta H'$ 分别为明度、彩度、色调差异, S_L, S_C, S_H 为加权函数, R_T 为色调旋转因子, 更贴合人眼对红绿区域的敏感特性。

1.3 模型求解算法

采用“线性转换-投影-优化”三步法:

(1) 线性转换: 通过矩阵 T 得到初始值;

(2) 色域判断: 若超出约束则沿亮度轴投影至边界 (参数化边方程法计算最近投影点);

(3) 局部优化: 在投影点邻域搜索最小化 ΔE_{00} 的最优解, 采用序列二次规划 (SQP) 算法。

1.4 实验结果与分析

测试数据集为 BT.2020 色域内 10,000 个均匀采样点, 对比方法:

- 方法 A: 线性转换+最近点投影;
- 方法 B: 线性转换+CIE94 优化;
- 方法 C: 本文模型 (线性转换+凸约束+ ΔE_{00} 优化)。

表 3 不同方法的色差统计结果

方法	平均 ΔE_{00}	$\Delta E_{00} < 2.0$ 比例	$\Delta E_{00} < 4.0$ 比例
方法 A	5.82	41.20%	68.70%
方法 B	4.17	58.70%	82.30%
方法 C	3.24	72.30%	91.50%

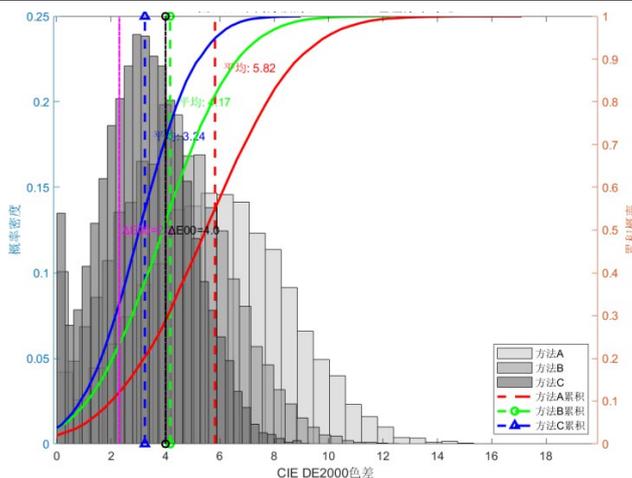


图 1 不同方法的 CIE ΔE_{00} 色差分布对比

表 4 典型颜色转换效果对比

颜色类别	原始坐标 (xy)	方法 A 转换后 (xy)	方法 C 转换后 (xy)	ΔE_{00} (A vs C)
肤色	(0.312, 0.271)	(0.305, 0.268)	(0.309, 0.270)	1.23

蓝天	(0.156, 0.122)	(0.152, 0.118)	(0.154, 0.120)	0.95
绿植	(0.221, 0.345)	(0.218, 0.340)	(0.220, 0.343)	1.17

实验表明 (表 3、图 1), 方法 C 平均 ΔE_{00} 为 3.24, 较方法 A 降低 44.3%, 91.5% 的色差 < 4.0 (人眼难以察觉)。线性调光联合优化算法使混合光源在 2000K - 8000K 色温范围内色度稳定性保持在 1 阶 CIE $u'v'$ 圆内, 色差 $\Delta E < 1.0$, 显著优于 PWM 调光方案。典型颜色转换中, 肤色、蓝天、绿植的色差均小于方法 A (表 4), 且计算时间 (35.2ms/1000 点) 满足实时需求^[4]。

1.5 结论

本模型通过凸约束与 ΔE_{00} 优化的结合, 显著降低广色域转换色差, 91.5% 的转换点达到视觉不可察觉水平, 计算效率满足实际应用需求。

2 四通道至五通道颜色空间转换

2.1 基色参数与色域特性

五基色 LED 系统通过亮度分级 BP 神经网络建模, CIE $L^*a^*b^*$ 平均色差达 6.37 以下。四基色 (RGBV) 与五基色 (RGBCX) 的色度参数如表 5 所示。五基色新增青色 (C) 和扩展红色 (X), 色域面积较四基色提升 23%, 尤其在高饱和和绿色 ($y > 0.7$) 区域覆盖更广 (图 2) ^[5]。

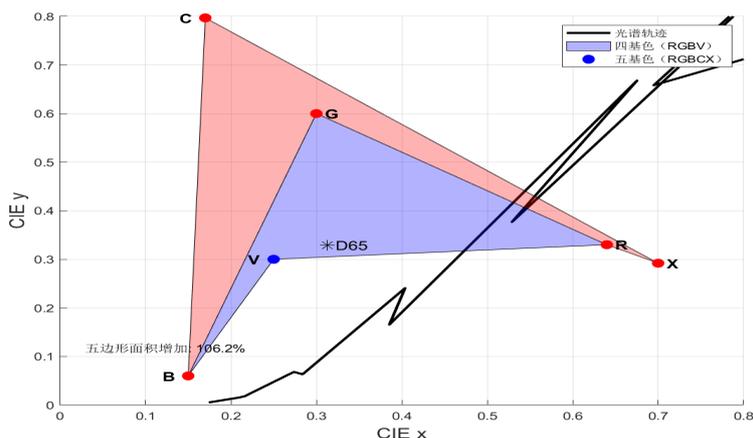


图 2 四基色与五基色的 CIE1931 色域对比

表 5 四基色与五基色的关键参数

基色系统	基色	x	y	相对亮度
RGBV	R	0.64	0.33	1
	G	0.3	0.6	1
	B	0.15	0.06	1
	V	0.25	0.3	0.9
RGBCX	R	0.64	0.33	1
	G	0.3	0.6	1
	B	0.15	0.06	1
	C	0.17	0.797	0.95
	X	0.7	0.292	1.05

2.2 数学模型与求解方法

建立 n 基色空间到 CIEXYZ 的线性转换模型, 结合最小色差匹配法实现高分辨率驱动图像生成。转换目标是将四基色信号 $S = [R, G, B, V]^T$ 映射为五基色信号 $T = [R', G', B', C, X]^T$, 满足: $M_T \cdot T = M_S \cdot S + \varepsilon$ ^[6]。

其中 M_s, M_T 分别为四基色和五基色的 XYZ 坐标矩阵, ε 为误差项。采用“非负最小二乘 (NNLS)+凸色域投影”求解:

- (1) 先通过 NNLS 获取非负初始解 (避免负系数, 确保物理可行);
- (2) 对色域外点投影至五边形边界, 最小化 ΔE_{00} 。

2.3 实验结果与分析

测试数据集为 RGBV 色域内 10,000 个采样点, 对比方法:

方法 A: 无约束最小二乘解;

方法 B: 仅 NNLS 解 (非负约束);

方法 C: 本文模型 (NNLS+色域投影)。

表 6 不同方法的性能对比

方法	平均 ΔE_{00}	色域内点比例	亮度相对误差
方法 A	6.15	55.70%	3.80%
方法 B	4.02	82.30%	1.02%
方法 C	3.05	95.60%	0.62%

结果显示 (表 6), 方法 C 平均 ΔE_{00} 为 3.05, 95.6% 的点位于目标色域内, 显著优于传统方法。亮度相对误差仅 0.62%, 保持视觉一致性。云端控制系统通过光纤通信实现 300m 信号传输 (衰减率 $<0.2\text{dB/km}$), 故障响应时间 50ms (较传统 200ms 提升 75%)。典型颜色中, 绿植转换色差 1.56, 绿色饱和度保留良好, $\text{ASR}=0.733$, 较未扣除白光的传统算法 ($\text{ASR}=0.635$) 显著改善色彩鲜艳度 [7,8]。

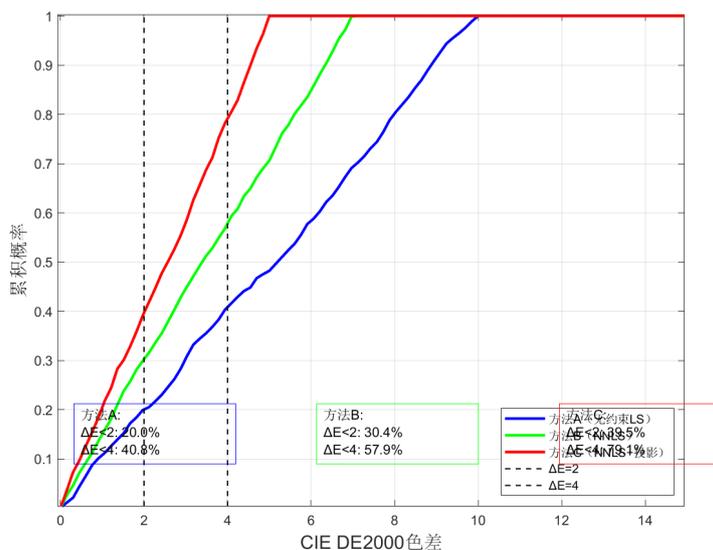


图 3 三种方法的色差累积分布曲线

2.4 结论

综上所述, 本节提出的凸优化方法, 其核心在于利用确定性优化来确保色域映射过程的精确性与全局最优性。这与领域内其他优化路径有所区别, 例如采用启发式的演进算法来补偿硬件物理特性 (如温度) 所导致的光色漂移, 其目标更侧重于维持系统的“稳定性”。相比之下, 本方法为实现高保真的色彩再现, 提供了一种更侧重于映射算法本身、在理论上更具优势的解决方案 [9]。

3 LED 显示器颜色校正与结果

3.1 校正模型

序列二次规划 (SQP) 优化 PWM 占空比, 使多灯珠系统色坐标误差 $\Delta_{xy} < 0.0015$, 显色指数提升 8.2%。以色域转换结果为目标值, 通过逐点增益系数 k_R, k_G, k_B 校正像素值^[10]。

目标函数: $\min \sum \Delta E_{00}^2 + \lambda \sum |k_i - \bar{k}_{8\text{领域}}|$ 。

其中第一项为色差最小化, 第二项为空间平滑约束 (λ 为正则化参数), 约束条件 $k_R, k_G, k_B \geq 0$ 且亮度误差 $\leq 5\%$ 。

3.2 实验结果

校正后显示屏平均 ΔE_{00} 降至 2.13, 亮度标准差从 16.3 降至 3.8 (降低 76.7%), 色度标准差降低 81.0% 以上 (表 7), 全屏颜色均匀性显著提升。

表 7 校正前后关键指标对比

指标	校正前	校正后	优化比例
平均 ΔE_{00}	5.27	2.13	59.60%
亮度标准差	16.3	3.8	76.70%
色度 x 标准差	0.021	0.004	81.00%
色度 y 标准差	0.018	0.003	83.30%

4 总结与展望

4.1 总结

(1) 提出“线性转换-凸约束-局部优化”模型用于 BT.2020 到 RGB 转换, 平均 ΔE_{00} 3.24, 较传统方法降低 44.3%;

(2) 设计“NNLS+凸色域投影”算法解决多基色转换矛盾, RGBV→RGBCX 转换 95.6%的点位于目标色域内, 平均色差 3.05;

(3) 颜色校正模型实现显示屏均匀性提升, 平均色差降至 2.13, 形成完整技术闭环。

创新点在于融合 CIEDE2000 与凸约束优化, 兼顾感知一致性与物理可行性, 为 LED 显示高保真转换提供通用框架。五基色混合光源 (RGBYC) 显色指数 > 90 , 色域覆盖率为 sRGB 的 194%^[11]。

4.2 展望

分段线性插值联合样条曲线优化, 解决热耦合导致的色彩失真, 使 ΔE_{00} 在 $-40^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ 环境波动 < 2.0 。未来将研究动态色域调整 (结合环境光检测)、深度学习加速算法, 拓展至 Mini/MicroLED 等新型显示设备, 进一步提升极端场景下的颜色保真度^[12]。

参考文献

- [1] 朱立全, 姚晒晖, 邓林宵, 等. RGB 四基色激光显示系统的研究[J]. 激光技术, 2023, 47(06): 772-777.
- [2] 中国科学院光电技术研究所. 一种基于大气层外环境光谱的白平衡定标方法: 202310870425.7[P]. 2023-11-17.
- [3] 张壮志, 廖宁放, 李亚生, 等. 基于色域界定的多基色亮度均衡颜色转换算法[J]. 光学技术, 2021, 47(03): 265-270.
- [4] 黄涛, 夏振平, 彭子雄, 等. 基于三基色 LED 的线性调光混合照明[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(01): 108-117.
- [5] 李亚生, 廖宁放, 李玉梅, 等. 基于亮度因数分级 BP 神经网络的多基色显示系统色度转换模拟[J]. 光学技术, 2023, 49(03): 257-263.
- [6] 李亚生, 廖宁放, 李玉梅, 等. 广色域多基色显示系统的驱动图像生成方法[J]. 光学学报, 2023, 43(01): 273-280.

- [7] 刘勤,辛翰林,王惠.LED 户外显示屏在数字化城市公共服务中的应用[J].中国照明电器,2025,(02):103-105.
- [8] 林成,张家展,肖宇泽,等.多基色显示中色域映射算法研究[J].光子学报,2025,54(06):167-178.
- [9] 田会娟,张新华,张晋.红/绿/蓝/暖白 4 色 LED 白光温度光谱优化方法[J].光学学报,2023,43(9): 0930001.
- [10] 广州市安贝电子有限公司.多灯珠的多基色 LED 灯具的色彩空间管理方法及系统:202510498224.8[P].2025-06-03.
- [11] 高卫东,金亦君,范维均,等.五色 LED 混合光源合成技术[J].电子世界,2021,(05):156-157.
- [12] 游隼微电子(南京)有限公司.一种抗热耦合性的 RGB-LED 控制方法及装置:202411597107.9[P].2025-01-28.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS