

# LED 车灯色度影响因素及安全控制研究

顾丹

(华域视觉科技(上海)有限公司 上海 201821)

**摘要:** 分析了LED车灯色度安全研究和控制的必要性,并对影响色度安全的五大主要因素进行了阐述。提出了充分考虑五种影响因素的基于光学模拟的色度安全模拟评价体系,定义了色度评价模拟分析具体步骤,并通过提供具体日行灯色度模拟评价案例对该模拟体系进行说明。

**关键词:** 色度;色品坐标;光学模拟;安全评估

## 1 绪论

随着LED光源在汽车车灯领域的大规模应用以及客户需求的不断提升,LED光源的主要光学性能包括亮度、色度面对的要求越来越高。各大光源供应商为了实现更好的产品性能,对影响LED发光性能的因素不断优化,新产品层出不穷。但是受限于半导体深层技术的局限,一些关键性能仍然面临不少挑战,实际应用中出现了一些以往不曾出现的,但又有可能导致严重的法规问题或者安全问题的难题,LED的色度问题就是其中具有典型代表性的一项。如何实现车灯色度安全成为前期光学设计过程中越来越重要的评估要素之一。

华域视觉科技(上海)有限公司早在2015年就开始对车灯色度安全及控制展开系统性研究,并开发了成熟而完备色度安全评估及控制体系,为确保产品的色度性能打下了良好的理论基础,同时也充分满足了客户对于车灯光色日渐苛刻的性能要求。

### 1.1 色度安全范围

国标GB4785-2007基于色品坐标理论体系,对LED各光色的范围做出了明确定义,如图1所示。所有灯具的色度测试均是严格按照该表格定义的范围进行,超出该范围的测试结果均认定为色度不合格。

光色	色度特性
红色	趋黄极限 $y \leq 0.335$ 趋紫极限 $y \geq 0.980 - x$
白色	趋蓝极限 $x \geq 0.310$ 趋黄极限 $x \leq 0.500$ 趋绿极限 $y \leq 0.150 + 0.640x$ 趋绿极限 $y \leq 0.440$ 趋紫极限 $y \geq 0.050 + 0.750x$ 趋红极限 $y \geq 0.382$
琥珀色	趋绿极限 $y \leq x - 0.120$ 趋红极限 $y \geq 0.390$ 趋白极限 $y \geq 0.790 - 0.670x$
黄色	趋红极限 $y \geq 0.138 + 0.580x$ 趋绿极限 $y \leq 1.29x - 0.100$ 趋白极限 $y \geq x + 0.940$ 趋光通量极限 $y \geq x + 0.592$

图1 国标对于光色范围的定义

通常借助色品坐标(如图2所示)对光源和车灯的色度进行标定。色坐标测量的基本原理是根据光源的光谱分布由色坐标的基本规定进行计算得出。颜色坐标的横轴为x,纵轴为y。色坐标中的不同点表示不同发光颜色,其中马蹄形边上的一圈是单波长可见光,饱和度最高;马蹄形内部是多波长混合光,离中心越近,饱和度越低。法规中定义的各

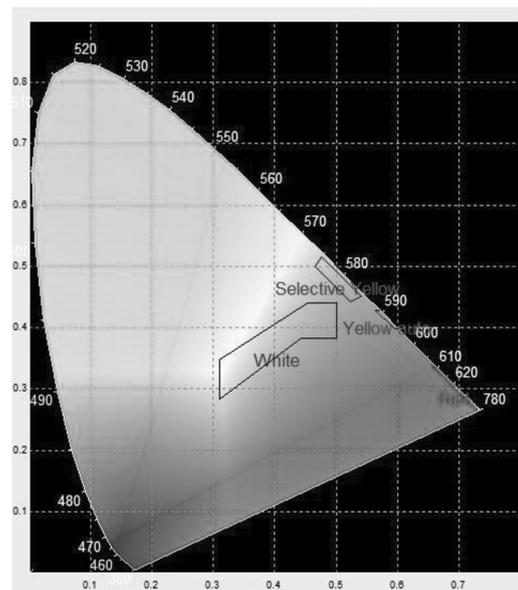


图2 色品坐标及各光色坐标范围

种光色及其范围在色品坐标中均有明确定义。

### 1.2 色度安全研究的必要性

车灯系统越来越复杂,车灯内部的各个子系统都会对色度造成不同程度的影响,如何保证灯具实测色度结果满足法规所定义的范围成为至关重要的研究课题。车灯色度影响因素繁多,控制复杂,通常会导致成本上升。因此,需要在开发过程中对灯具色度的影响因素充分识别,并对各种影响进行综合评估和控制,进而设置合理的安全余量控制区间,才能有效避免实际产品的色度无法满足法规要求。

## 2 灯具色度影响因素

灯具色度的主要影响因素包括温度、电流、光线出射角度、光源色度档位分布以及光学材料等。在实际项目开发中需要精确控制这些因素对车灯色度的影响,并根据色度安全评估标准对各种因素做出精确限定,从而确保整灯系统满足色度法规要求。

### 2.1 温度对色度的影响

LED发光特性对温度的依赖性很强,温度的变化会引起输出光通量和主波长的改变。随着温度的变化光谱相关参数会发生变化,如峰值波长会向长波方向移动、半高宽度增

大及峰值能量减小等。这主要是由于载流子能量分布、电子迁移率等参量随温度发生变化，引起 LED 光谱特征发生改变。图 3 为 LED 内部温度传导示意图。 $T_j$  温度 (LED 结温) 是 LED 重要性能参数之一，通常随着  $T_j$  温度的升高，LED 的显色性能和光通量均会降低。具体到色度而言，在一定电流条件下  $T_j$  温度升高时 LED 色坐标  $x$ 、 $y$  数值均一定程度增加，如图 4 所示，从而导致 LED 色度出现不同程度的波动，例如，对于白光 LED，当色坐标  $x$ 、 $y$  均增加时，其色度不合格的风险会明显提升。

基于图 4 中的色度随温度的变化曲线 ( $I=1000\text{mA}$ )，可以得出色坐标相对于温度变化的拟合公式：

$$x = -1e-06 \times 2 + 0.0002T - 0.0067, R^2 = 0.9891$$

$$y = -2e-06 \times 2 + 0.0003T - 0.0127, R^2 = 0.9915$$

通过理论计算，可精确得出在一定电流下任意温度时的色坐标，进而对温度变量导致的影响精确评估和控制。

### 2.2 电流对色度的影响

LED 的光电性能与其驱动电流大小有着直接关系。当  $T_j$  温度固定时，随着驱动电流的变化 LED 色度值也会呈现一定规律的变化 (如图 5 所示)。根据该变化曲线，也可以得出色度随电流变化的拟合公式，从而对色度变化进行精确控制。相对于  $T_j$  温度导致色度变化，驱动电流在常用区域内变化时导致色度值的变化量较小。

图 6 是某车型前位置灯点亮效果。图示左侧灯 (格栅灯)

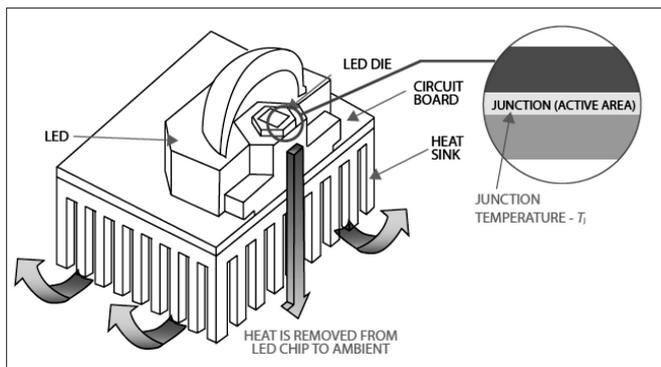


图 3 LED 温度传导示意图

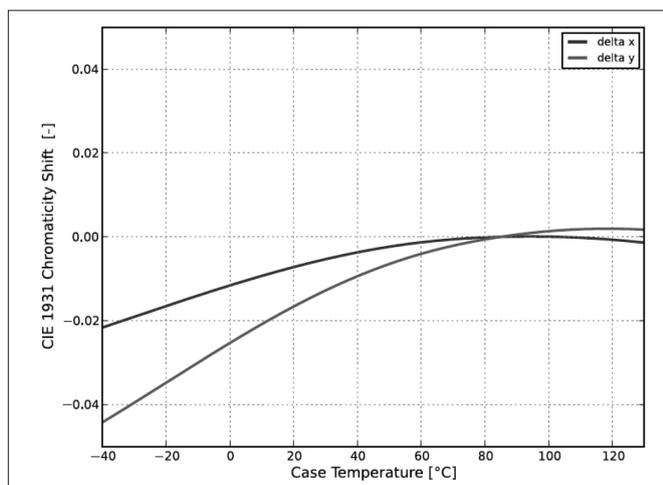


图 4 色坐标随温度的变化曲线

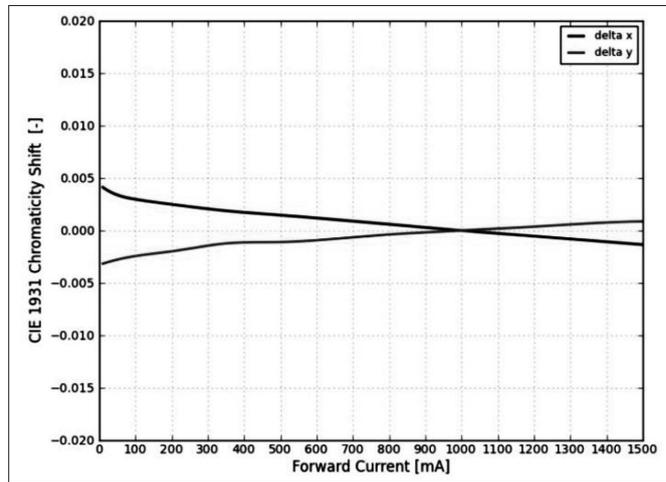


图 5 色度随电流变化关系

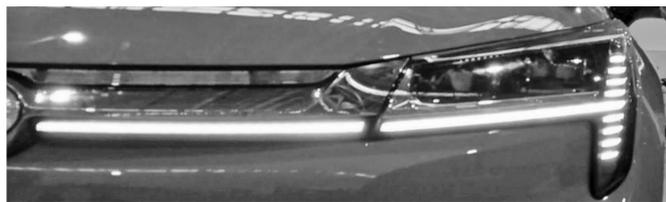


图 6 电流不同时色度不匹配现象

灯与图示右侧灯 (大灯) 采用相同的光学系统和 LED 光源，但是呈现出的光色有明显差别：格栅灯偏蓝，大灯偏黄。造成这一现象的根本原因就是两灯光源的驱动电流有明显差异。

### 2.3 光线出射角度对色度的影响

如图 7 所示，某型号 LED 随着出射角度的变化，其色品坐标值  $C_x$  和  $C_y$  均有不同程度的增加，在外观颜色上表现为发黄。根本原因在于 LED 芯片中心蓝光光谱能量比较强，往四周呈现逐渐减小的特征，从而导致四周黄光光谱逐渐增加，视觉上造成大角度观察呈现发黄的现象。这种在大角度下发黄的现象也较为普遍。在实际开发中，应该严格控制大角度光线的出射方向和比例，主要通过精密的光学系统来严格控制大角度出射光对色度的影响。

### 2.4 LED 色度档分布对色度影响

为了细化 LED 色度范围，便于管控色度符合需求。LED 在封装工艺后，会依据其色度范围划分为不同的色度档。比如对于目前常用的白光 LED 主要采用蓝光 LED 芯片 + YAG 黄光荧光粉方式产生白光，即利用 GaN 基蓝光芯片激发 YAG 荧光粉发出黄光，与剩余的蓝光混合产生白光，并且可以通过调控蓝光和黄光的强度比例，从而产生不同色温的白光。图 8 所示为某厂商一款白光 LED 的色度档划分情况，不同档位之间的色度坐标存在较大的差异性。对于实际使用的 LED，其色度档需要严格控制。若是档位较多，则会导致不同档位之间存在明显的视觉差异，导致匹配问题。

### 2.5 光学系统材料属性对灯具色度的影响

透光材料对 LED 不同波长光谱的吸收率是不同的，通

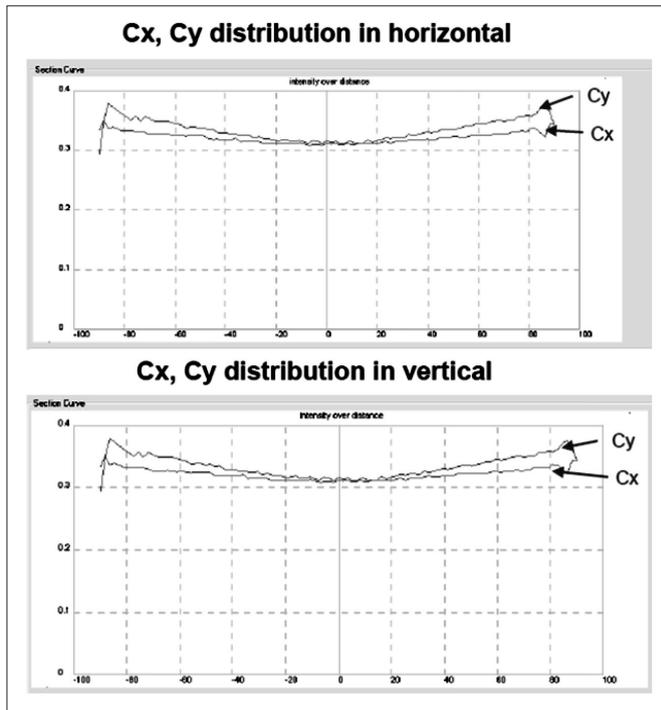


图 7 色度随光线出色角度的变化示意图

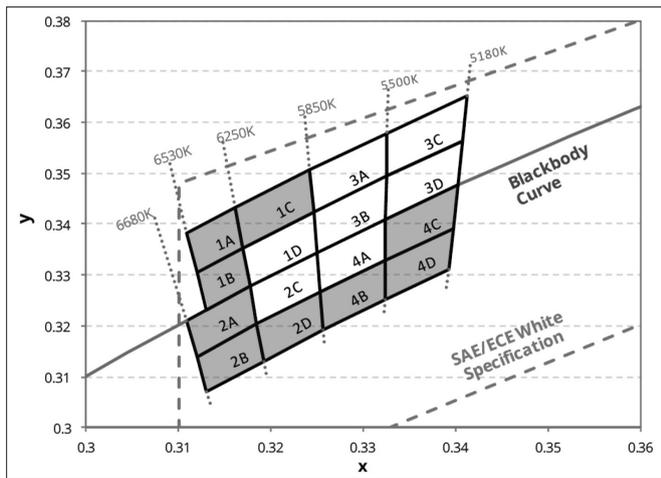


图 8 色度档划分示意图

常都是短波长区域吸收率要大于长波长区域。这也导致了 LED 发出的光线经过透光光学零件后，其色度会出现明显的变化。且不同材质的透光零件，其吸收率也不尽相同。图 9 和图 10 分别为 LC1500 和 LED2245-000000 两种 PC 零件在不同波长下的吸收系数。

### 3 灯具色度安全控制模拟方法与余量设置

在车灯开发过程中，应该及时对色度安全进行精确的模拟评估。本文提出一种考虑多方面色度影响因素的基于光学模拟软件的色度安全模拟评价体系。

#### 3.1 LED 灯具色度安全模拟方法

本文以更加复杂的多波长混合白色 LED 光源和灯具作为研究对象，定义了一种色度安全模拟方法。目前白光 LED 的实现方式有三种，但主要已蓝光 LED 芯片+YAG 黄光荧光粉方式为主。利用 GaN 基蓝光芯片激发 YAG 荧光粉

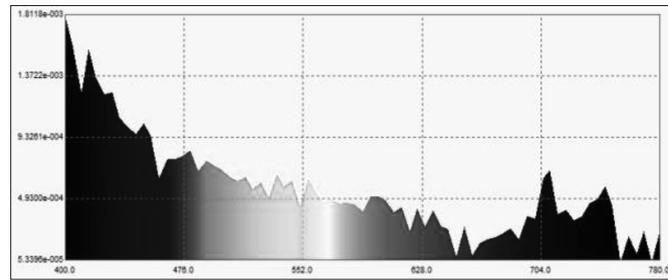


图 9 LC1500 光谱吸收率

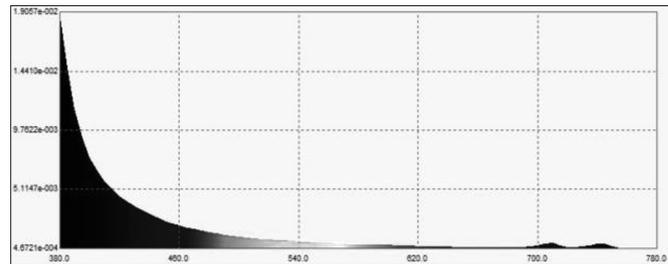


图 10 LED2245 光谱吸收率

发出黄光，与剩余的蓝光混合产生白光，并通过调控蓝光和黄光的强度比例，从而产生不同色温的白光。基于白色 LED 光源的特性，以及前文所述 LED 色度影响因素，本文提出一套色度模拟评估方法。模拟及评估的具体步骤如下。

- (1) 模拟得到整灯的色坐标并与光源典型色坐标进行比较得到  $(\Delta Cx1, \Delta Cy1)$ ；
- (2) 确定 LED 光源色度档的色度范围  $[Sx, Sy]$ ；
- (3) 基于 LED 在整灯内的温度变化，确定色度漂移  $(\Delta Cx2, \Delta Cy2)$ ；
- (4) 基于电流对 LED 色度的影响，确定色度漂移  $(\Delta Cx3, \Delta Cy3)$ ；
- (5) 确定整灯色度范围  $[Sx+\Delta Cx1+\Delta Cx2+\Delta Cx3, Sy+\Delta Cy1+\Delta Cy2+\Delta Cy3]$ ；
- (6) 进行整灯色度法规风险评估。

其中，整灯色度模拟需要基于 LED 光源典型光谱文件，利用光学模拟软件模拟得出；LED 色度档范围可以通过光源 datasheet 获取；温度和电流对色度影响的偏移量需要结合 LED 色度相对于温度和电流变化的特性曲线（如图 4 所示）复合计算得出；结合前 4 步的模拟和计算就可以得出整灯色度分布范围，进而就可以对该范围进行安全风险评估。

例如某灯具日行灯功能采用了光导系统，对其进行色度安全模拟评估。如图 11 所示，LED 色度分布在蓝色线框以内，首先通过调用该 LED 光源属性文件模拟可以得出整灯色坐标并与 LED 典型色坐标对比可以得出  $\Delta Cx1=0.026$ ， $\Delta Cy1=0.037$ ；基于 LED 温度和电流变化的特性曲线得出  $\Delta Cx2=0.004$ ， $\Delta Cy2=0.009$ ， $\Delta Cx3=0.002$ ， $\Delta Cy3=0.003$ 。那么即可得到整灯色度分布范围，如图 11 中红色线框所示。此时，该范围已经有部分超出法规，因此存在较大的色度不合格风险。

#### 3.2 LED 灯具色度安全余量设置

通过上述分析可得，为了确保整灯色度安全，在灯具

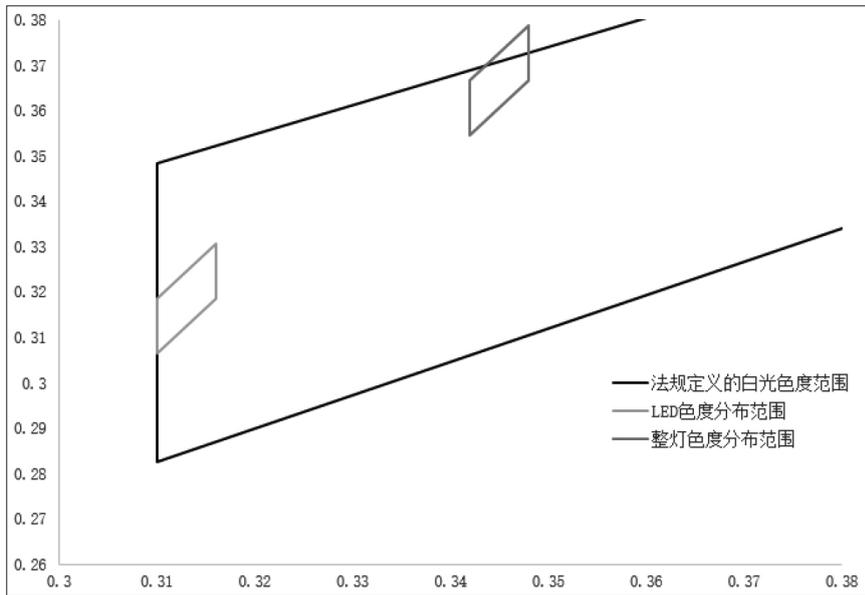


图 11 某灯具日行灯色度模拟评估结果

开发过程中需要对整灯色度和 LED 色度设置合理安全余量，以降低灯具色度不合格的风险。该安全余量一方面需要基于精确的模拟体系得出，更需要与灯具色度测试结果进行对比修正，同时也需要兼顾光学方案的整体经济性。经过大量对比与总结，发现比较合理的整灯色度安全余量为：色坐标分布于法规定义边界距离不小于 0.005。

#### 4 结语

本文结合实际项目色度模拟与实测情况，详细研究了影响信号灯色度的主要因素，分别对  $T_j$  温度、驱动电流、发光角度、色度档位分布以及光学系统等因素展开讨论，为更加充分评估和分析色度安全提供了必要的理论基础。通过充分分析 LED 灯具色度的影响因素，着重对色度模拟方法和安全余量进行了阐述。结合本文研究内容，后续可以在以下 5 个方面开展更加深入的研究与应用。

(1) LED 节点温度会影响其色度特性，且随着温度的变化光谱相关参数会发生变化，如峰值波长会向长波方向移动。在 LED 选型方面需要关注 LED 的节点温度下其色度坐标情况。

(2) LED 在大角度情况下存在发黄现象。主要是 LED 芯片中心蓝光光谱能量比较强，往四周呈现逐渐减小的特

征，从而导致四周黄光光谱逐渐增加，视觉上造成大角度观察呈现发黄。在 LED 选型上需要关注灯具的安装高度，若是安装位置偏低，建议 LED 选择上选择色温偏高档位。

(3) LED 的驱动电流影响 LED 的各项特性，其中电流的增加，LED 出光的色度坐标一定程度的相应递增。在 LED 选择上需要关注对应电流条件下其色度坐标情况，特别是采用 PWM 谐波降低光通量的方式，其 LED 对应的色度坐标为高电流状态，并非因为 PWM 降低光通量而导致色度坐标的改变。

(4) 色温也是改善视觉感官的一个指标，随着 LED 驱动电流的增加，白光 LED 的色温相应增加，偏向冷光系列。在 LED 选型上也可以考虑通过色温的途径选择合

适的 LED。

(5) 色度档的选取遵循匹配一致的原则，尽量减少档位的数量，从而避免因色度档过多导致的相互匹配不良问题。

#### 参考文献：

- [1] Standard Test Method for Specular Gloss of Plastic Films and Solid Plastics: ASTM D2457-1990[S].
- [2] 罗毅, 冯泽心, 韩彦军, 李洪涛, 钱可元. 面向半导体照明的光学[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900117.
- [3] 曹宇杰, 金尚忠, 岑松原. 高显色指数 LED 灯的设计[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1222002.
- [4] 雷瑞瑞, 吕毅军, 高玉琳, 陈国龙, 陈莹亮, 陈忠. 脉冲法测试功率 LED 热光参数[J]. 光学学报, 2009, 29(s2): 342.
- [5] 马煜, 陈革, 林弋戈. CIE 新推荐的应用于色度学的几何条件[J]. 照明工程学报, 2007, 18(4): 13-15.
- [6] 李有楨, 王金城, 王晶. 白光 LED 光源测量及色度评价之研究[J]. 照明工程学报, 2007, 18(3): 66-68.
- [7] 王亚男, 雍静. 三基色白光 LED 光源颜色稳定性的研究[J]. 照明工程学报, 2007, 18(3): 58-60, 65.
- [8] 荆其诚. 色度学[M]. 北京: 科学出版社. 1979: 120-126.