

# 高光色品质 LED 照明光源研究

赖传杜, 庄其仁, 胡奕彬, 刘士伟

华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

**摘要** 为解决现有高显色指数发光二极管(LED)光源仍然存在富蓝光危害的问题,基于人眼光谱光视效率、辨色函数和光谱响应度函数建立了被测光源光谱与参考光源光谱视觉相似度模型,提出一种以光谱视觉相似度参数( $R_V$ )设计高光色品质 LED 合成照明光源的方法。采用国际照明委员会(CIE)推荐的标准光源 D50 作为参考光源,将冷白光、暖白光、红色光、绿色光、青色光和蓝色光 6 种 LED 组合,通过遍历优化的方法计算各种 LED 的组合灯珠数量,根据  $R_V > 96$  的指标要求设计的 LED 合成光源相关色温范围为 4000~7000 K,一般显色指数  $R_a > 95$ ,符合高光色品质健康照明光源要求,证明了该设计方法的合理性。研究结果还表明,选择不同色温的 CIE 标准光源作为参考光源,可以设计不同色温要求的高显色性白光。

**关键词** 光学器件; 发光二极管; 光色品质; 显色指数; 蓝光危害; 光谱视觉相似度

**中图分类号** TN312+.8      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.062302

## Research on Lighting Sources of High Photometric-Colorimetric Properties LEDs

Lai Chuandu, Zhuang Qiren, Hu Yibin, Liu Shiwei

Key Laboratory of Light Propagation and Transformation of Fujian Province, Collage of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

**Abstract** In order to solve the contradiction that light emitting diode (LED) lighting sources with high color rendering index may still exist rich-blue light hazards, the spectral visual similarity model of test light source spectrum with the reference light source spectrum is established based on spectral luminous efficiency, color-resolution function and spectral response function. A method is proposed to design high photometric-colorimetric property LED synthetic light source according to spectral visual similarity parameter ( $R_V$ ). Using the D50, the standard light source recommended by Commission Internationale de L'Eclairage (CIE), as reference illuminant, with the LEDs of cold white, warm white, red, green, cyan and blue are combined. The lamp numbers of all kinds of LED combination are calculated by traverse optimization method. According to the requirement of  $R_V > 96$ , it turns out that the corresponding color temperature range of LED synthetic light source is between 4000-7000 K, and the general color rendering index  $R_a > 95$  are accordant with the requirements of high photometric-colorimetric property and health in illumination light sources. Which proves the rationality of the proposed method. The results also show that, by choosing CIE standard light source with different color temperatures as the reference illuminant, we can design high color rendering of white light with different color temperatures.

**Key words** optical devices; light emitting diode; photometric-colorimetric property; color rendering index; blue light hazard; spectral visual similarity

**OCIS codes** 230.3670; 120.2040; 110.6880; 350.2770

**收稿日期:** 2017-02-14; **收到修改稿日期:** 2017-02-24

**基金项目:** 福建省科技计划重点项目(2012H0029)、泉州市科技计划项目(2014Z105)、福建省光传输与变换重点实验室开放课题(20150102)

**作者简介:** 赖传杜(1990—),男,硕士研究生,主要从事 LED 照明方面的研究。E-mail: 745147608@qq.com

**导师简介:** 庄其仁(1960—),男,研究员,硕士生导师,主要从事半导体照明技术和光电检测技术等方面的研究。

E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn(通信联系人)

# 1 引言

室内照明光源经历了白炽灯、日光灯、节能灯和发光二极管(LED)的发展过程。过去,人们对照明光源的要求主要在照亮和节能两个方面。随着生活水平的提高,光源的光品质越来越受到人们的重视,特别是在室内照明领域,如博物馆、家居等室内空间,对光品质的重视远远大于对光效的要求<sup>[1]</sup>。其中,光生物安全问题也成为室内照明光源的一个重要研究内容<sup>[2]</sup>,特别是在蓝光伤害方面已有大量文献的报道<sup>[2-5]</sup>。同时,由于青少年近视比例一直居高不下,并且有继续严重的发展趋势,这些因素都使人们对高光色品质的照明光源有更高的需求。

在传统方法中,对高光色品质照明光源评价的主要指标是显色指数(CRI)和相关色温(CCT)。但随着新光源的出现和研究的深入,显色指数评价光源显色性存在的问题也日益凸显<sup>[6-7]</sup>。而且,在设计高光色品质照明光源时,需要同时计算显色指数和相关色温,这两个参数的计算方法繁琐,对于采用多种LED组合的合成白光光源的设计来说其计算量巨大。因此,还需寻找新的普适方法和指标<sup>[8]</sup>来对高光色品质照明光源进行评价,新的评价方法和指标还应考虑光生物安全,特别是由于较强蓝光的存在所引起的蓝光危害风险,并且需简化计算模型。为此,本文首先分析了人眼的光谱光视效率、对应的辨色函数和光谱响应度函数,然后将这些因素作为照明光源光谱和参考光源光谱的视觉相似度因子,建立光谱视觉相似度参数模型,采用国际照明委员会(CIE)推荐的标准光源D50作为参考光源,用于设计和研究高光色品质的LED合成照明光源。

## 2 照明光源光谱视觉相似度参数

### 2.1 人眼光色响应特性

人眼对功率(光强度)相同但波长不同的单色光所感受到的明亮程度是不同的。眼睛的光强灵敏度与波长的依赖关系称为光谱光视效率<sup>[9]</sup>。光谱光视效率分为明视觉和暗视觉两种,如图1所示。作为照明用LED光源,照度必须大于 $10 \text{ cd/m}^2$ ,因此以下讨论均采用明视觉光谱光视效率,定义为 $V(\lambda)$ ,其中 $\lambda$ 为波长。这样,波长为 $\lambda$ 的光源 $S(\lambda)$ 对人眼的客观亮度刺激光强度为

$$W(\lambda) = k_0 S(\lambda) V(\lambda), \quad (1)$$

式中 $k_0$ 为客观刺激系数。

依据Weber-Fechner定律,可以推导出人眼主观感受光强度 $M(\lambda)$ 与客观刺激光强度 $W(\lambda)$ 呈对数关系<sup>[10-11]</sup>

$$M(\lambda) = k_1 \ln W(\lambda), \quad (2)$$

式中 $k_1$ 为主观刺激系数。

(2)式代表人眼对不同波长(颜色)的光的强度(亮度)的响应能力,当光源 $S(\lambda)$ 为等能光谱分布时,人眼主观感受客观亮度刺激光强度的响应 $w(\lambda)$ 的曲线如图2所示,与图1相比,人眼主观感受强度随波长的变化比光谱光视效率变化缓慢,响应曲线较平坦。

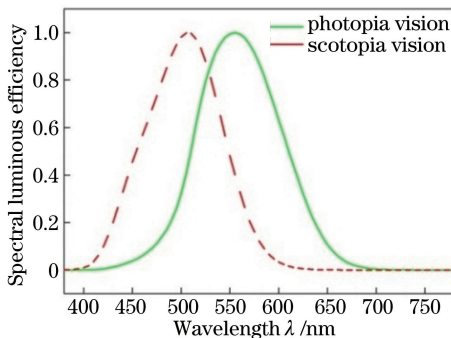


图1 光谱光视效率曲线

Fig. 1 Curves of spectral luminous efficiency

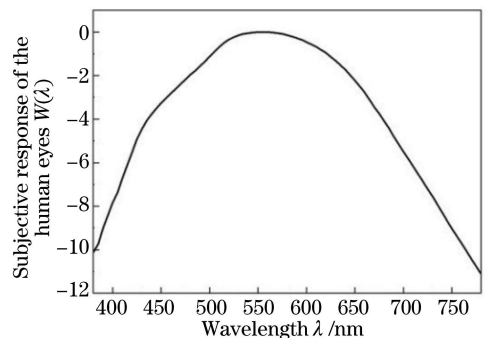


图2 归一化光谱的人眼主观感受响应曲线

Fig. 2 Subjective response of the human eyes for normalized spectrum

对于功率(光强度)相同但波长不同的复色光,人眼对其中不同波长光的分辨能力是不同的。人眼对不同颜色波长的分辨阈值实验曲线如图 3 所示<sup>[9]</sup>,可见人眼对绿色光(波长为 500 nm)和橙色光(波长为 610 nm)的颜色分辨力最好,能够分辨出波长相差 1 nm 的颜色差别;人眼对红光和蓝紫光(波长为 650 nm)的分辨力最差,在波长大于 650 nm 的红光波段和波长小于 450 nm 的蓝光波段,人眼分辨颜色的波长阈值急剧增大,波长需相差 3 nm 以上人眼才能分辨出颜色的差别<sup>[12]</sup>。因此,对于(2)式表示的人眼对光源的主观感受强度公式中,如果再考虑人眼对颜色的感受,则可用颜色分辨阈值表示。颜色分辨阈值越小,表明人眼分辨颜色能力越强,因此人眼对颜色的响应可表示为颜色分辨阈值的倒数,定义为人眼辨色力,归一化辨色力函数  $g(\lambda)$  可写为

$$g(\lambda) = \frac{\min(\Delta\lambda_{th})}{\Delta\lambda_{th}}, \quad (3)$$

式中  $\Delta\lambda_{th}$  为人眼辨色阈值, $g(\lambda)$  分布曲线如图 4 所示。显然,人眼的光色响应  $L_c(\lambda)$  可用主观感受强度和辨色力函数的乘积表示

$$L_c(\lambda) = g(\lambda)M(\lambda) = k_1 g(\lambda) \ln [k_0 S(\lambda)V(\lambda)]. \quad (4)$$

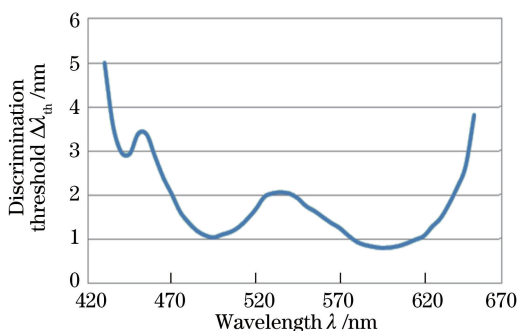


图 3 人眼对可见光的波长分辨力

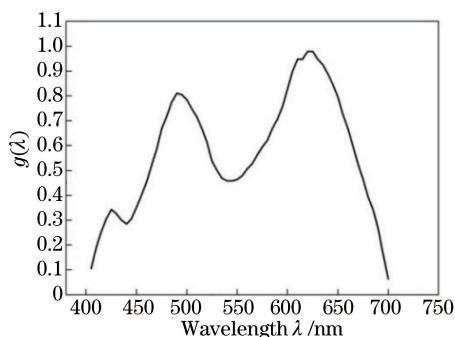


图 4 人眼辨色力函数曲线

Fig. 3 Wavelength resolution of the human eye to visible light

Fig. 4 Color resolution function curve of the human eye

当  $S(\lambda)$  是等幅度为 1 的光谱分布时,人眼的光色响应曲线如图 5 所示。图 5 说明对于一个均匀光谱分布的白光,人眼的主观光色感受是不均匀的,也就是说不同波长的光对主观光色感受的权重不同<sup>[13-14]</sup>。

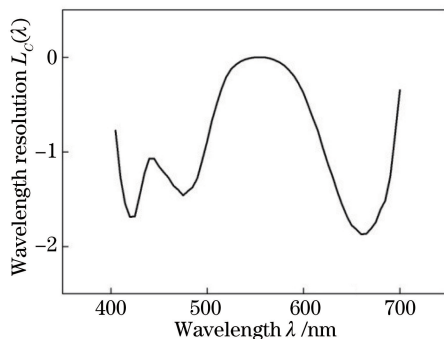


图 5 归一化光谱的人眼光色响应曲线

Fig. 5 Photometric-colorimetric response curve of the human eye for normalized spectral

## 2.2 光谱视觉相似性与光色品质的关系

根据信号相关性原理<sup>[15]</sup>,比较两光源光谱曲线  $S_1(\lambda)$  和  $S_2(\lambda)$  的相似程度可以用相关系数表示,光谱相似度  $r_s$  可表示为

$$r_s = \frac{\int [S_1(\lambda) - \mu_1] [S_2(\lambda) - \mu_2] d\lambda}{\sqrt{\int [S_1(\lambda) - \mu_1]^2 d\lambda} \sqrt{\int [S_2(\lambda) - \mu_2]^2 d\lambda}}, \quad (5)$$

式中  $\mu_1$  和  $\mu_2$  分别为  $S_1(\lambda)$  和  $S_2(\lambda)$  的均值。

同样,比较两光源光谱的人眼主观感受光强度  $M_1(\lambda)$  和  $M_2(\lambda)$  的相似程度可用光谱视觉相似度  $r_V$  表示:

$$r_V = \frac{\int [M_1(\lambda) - \nu_1] [M_2(\lambda) - \nu_2] d\lambda}{\sqrt{\int [M_1(\lambda) - \nu_1]^2 d\lambda} \sqrt{\int [M_2(\lambda) - \nu_2]^2 d\lambda}}, \quad (6)$$

式中  $\nu_1$  和  $\nu_2$  分别为  $M_1(\lambda)$  和  $M_2(\lambda)$  的均值。

理论上,  $S(\lambda)$  为等能光谱分布的白光(标准照明体 E), 是理想白光, 但由于蓝紫光和红光的光色视觉权重低, 且等能光谱分布的白光光源难以实现, 因此 CIE 建议的标准光源为非等能光谱分布。几种 CIE 标准光源光谱与等能光谱(标准照明体 E) 的光谱相似度和光谱视觉相似度比较如表 1 所示, 可以看出, 虽然各种标准光源光谱与等能光谱的光谱相似度不高, 但它们的光谱视觉相似度都很高 ( $r_V > 0.97$ ), 这说明, 可以将光色品质很高的 CIE 标准光源统一在光谱视觉相似度这个参数中, 因此可定义光源光谱视觉相似度参数为

$$R_V = r_V \times 100. \quad (7)$$

表 1 几种 CIE 标准光源光谱与等能光谱的光谱相似度和光谱视觉相似度

Table 1 Spectral similarity and spectral vision similarity of several CIE standard illuminants spectrum and equal energy spectrum

CIE standard illuminant	Spectral similarity	Spectral vision similarity
D65	0.228	0.984
D55	0.365	0.981
D50	0.372	0.974
D75	0.110	0.983
A	0.163	0.971

由(1)~(7)式可得:

$$R_V = \frac{\int \{g(\lambda) \ln [S_1(\lambda)V(\lambda)] - \nu_1\} \{g(\lambda) \ln [(S_2(\lambda)V(\lambda)] - \nu_2\} d\lambda}{\sqrt{\int \{g(\lambda) \ln [S_1(\lambda)V(\lambda)] - \nu_1\}^2 d\lambda} \sqrt{\int \{g(\lambda) \ln [(S_2(\lambda)V(\lambda)] - \nu_2\}^2 d\lambda}} \times 100. \quad (8)$$

可见, 若以 CIE 建议的标准光源作为参考光源, 则被测光源的  $R_V$  值越高, 该光源的光色品质就越高。显然, 对于参考光源, (8)式计算得到的光谱视觉相似度参数  $R_V = 100$ 。

### 3 高光色品质 LED 合成照明光源设计

采用多种不同颜色的 LED 组合, 理论上可以实现与标准光源基本一致的光谱分布曲线, 但考虑到实现成本和发光效率等因素, 实际应用中只能采用有限的几种 LED, 本研究选择 6 种具有光谱互补特性的 LED, 分别为冷白光、暖白光、红色光、绿色光、青色光和蓝色光 LED<sup>[16]</sup>。采用远方 HAAS-2000 光谱分析系统测得上述各种 LED 灯珠光谱曲线(图 6)和单颗 LED 光色参数(表 2), 其中  $N_{\text{LER}}$  表示光视效能参数<sup>[17-18]</sup>,  $T_c$  为相关色温,  $R_a$  为一般显色指数,  $D_{uv}$  代表光源与标准黑体轨迹曲线的距离,  $u, v$  分别是色坐标位置。设上述 6 种 LED 的光谱功率密度函数分别为  $s_{21}(\lambda), s_{22}(\lambda), \dots, s_{26}(\lambda)$ , 第  $n$  种 LED 的数量为  $g_n$  ( $n=1, 2, \dots, 6$ ), 则 LED 合成白光光源光谱分布函数  $S_2(\lambda)$  可表示为

$$S_2(\lambda) = g_1 s_{21}(\lambda) + g_2 s_{22}(\lambda) + \dots + g_6 s_{26}(\lambda). \quad (9)$$

表 2 6 种 LED 灯珠的光色参数

Table 2 Photometric-colorimetric parameters of six kinds of LED lamps

LED lamp	$T_c / K$	$R_a$	Luminous lx /lm	Peak wavelength /nm	$N_{\text{LER}} / (\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$	$D_{uv}$
Cold white	12658	80.7	67.14	450	264.92	-0.0118
Warm white	4005	69.7	84.78	448, 580	348.42	0.0034
Red			7.45	631	207.41	
Green			31.39	508	371.08	
Blue			5.07	454	48.20	
Cyan			20.18	496	255.29	

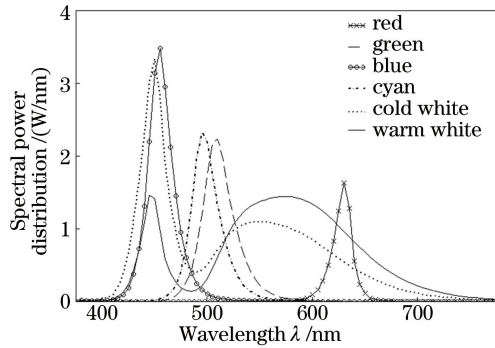


图6 6种LED灯珠光谱功率分布曲线图

Fig. 6 Spectral power distribution of six kinds of LED lamps

通常,人们把自然光下看到的物体颜色作为真色,因此太阳光被认为是完美光源,CIE推荐的标准光源D50代表相关色温为5000K的直射日光,光色相当于中午的日光<sup>[9]</sup>,可作为参考光源 $S_1(\lambda)$ ,将(9)式代入(8)式,通过遍历优化的方法计算各种LED灯珠数量。以光谱视觉相似度参数 $R_v > 96$ 为指标进行参数优化设计,得到的设计结果如表3所示,其中参数 $g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6$ 分别为冷白光、暖白光、红光、绿光、青光和蓝光LED的灯珠数量。分析表3的数据可以看到,富蓝光的冷白光LED灯珠不能与其他灯珠组成高光色品质的合成白光,采用暖白光、红色光、绿色光、青色光的LED灯珠经过优化灯珠数量比例可以得到 $R_v$ 高达96以上(最高达到98.58)的优质白光。也就是说,所设计的光源的光谱视觉响应曲线与参考光源的光谱视觉响应曲线达到很高的相似度,基本接近。

表3 6种LED组合成的高光色品质( $R_v > 96$ )光源设计结果Table 3 Designed results of high photometric-colorimetric properties ( $R_v > 96$ ) of light sources mixed with six kinds of LEDs

$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_5$	$g_6$	$R_v$	$D_{uv}$
0	20	24	0	10	0	96.27	-0.0041
0	20	23	0	11	0	96.26	-0.0024
0	20	22	0	12	0	96.53	0.002
0	20	21	0	12	0	96.65	0.0054
0	20	20	0	13	0	96.40	0.0064
0	20	20	2	12	0	96.72	0
0	20	19	1	14	0	96.54	0.0013
0	20	19	5	11	0	98.45	0.0021
0	20	20	7	11	0	98.58	0.0045
0	20	20	14	0	6	96.61	0.0063
0	20	16	18	0	11	96.68	0.0083
0	20	14	19	0	13	96.10	0.0077

#### 4 合成白光光源的色温和显色指数

为了证明表3所列LED合成白光具有高光色品质,计算了表3中各种灯珠组合的合成白光光源的相关色温 $T_c$ 和一般显色指数 $R_a$ <sup>[19]</sup>,如表4所示。可以看到,合成白光光源的相关色温 $T_c$ 在3766~6720K范围内,一般显色指数 $R_a > 95$ ,色温范围与自然光的色温变化范围一致,且显色指数很高,符合当前业界认可的高光色品质照明光源要求。

为进一步证明以光谱视觉相似度参数 $R_v$ 为指标进行参数优化设计的合理性,表5给出了色温高于7000K的LED合成白光的灯珠数量 $g_1 \sim g_6, T_c, R_a$ 和 $R_v$ 数据。可以看出,高色温高显色指数LED合成白光光源要求含有蓝光的灯珠( $g_1$ 和 $g_6$ )所占比例很高,蓝光比例太高将引起光生物安全问题。根据2012年国际电工委员会(IEC)发布的技术报告IEC/TR 62778-2012《IEC 62471标准的光源和灯具的蓝光危害评价应用》<sup>[20]</sup>和2006年国家推荐标准GB/T 20145-2006<sup>[21]</sup>可知,蓝光危害是由光谱辐射亮度加权蓝光危害系

数得到,在蓝光危害限值范围内,色温和容许亮度成反比<sup>[22]</sup>。因此,高色温高显色指数 LED 合成白光光源的色温应选择一个合适的范围,若以平均日光色温(5500 K)作为参考值,取  $4000\text{ K} < I_c < 7000\text{ K}$  作为色温取值范围,则表 5 中色温高于 7000 K 的高色温合成光源不适合作为健康照明光源,而表 5 中光谱视觉相似度参数  $R_v$  都小于 96,并且随着色温升高而显著下降,不满足光谱视觉相似度参数的指标要求( $R_v > 96$ ),而被排除,可见以光谱视觉相似度参数  $R_v$  为指标进行参数优化设计是合理的。

表 4 合成光源的光谱视觉相似度参数  $R_v$ 、相关色温  $T_c$  和一般显色指数  $R_a$

Table 4 Corresponding spectral visual similarity  $R_v$ , CCT  $T_c$  and color rendering index  $R_a$  of synthetic light sources

$R_v$	$T_c / \text{K}$	$R_a$	$D_{uv}$
96.27	3766	97.32	-0.0041
96.26	3869	97.69	-0.0024
96.53	3973	97.82	0.002
96.65	4011	97.75	0.0054
96.40	4118	97.48	0.0064
96.72	4205	97.09	0
96.54	4304	96.47	0.0013
98.45	4404	95.74	0.0021
98.58	4507	95.02	0.0045
96.61	4939	95.34	0.0063
96.68	6159	96.20	0.0083
96.10	6720	96.49	0.0077

表 5 高色温 LED 合成光源参数

Table 5 LED synthetic light source parameters with high color temperature

$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_5$	$g_6$	$T_c / \text{K}$	$R_a$	$R_v$	$D_{uv}$
0	20	14	20	0	15	7194	96.99	95.16	0.0045
0	20	13	20	0	17	7756	97.28	94.54	0.0071
0	20	13	21	0	18	8067	97.44	94.38	0.0033
0	20	12	22	0	20	8779	97.67	93.90	0.0065
0	20	11	22	0	22	9567	97.76	93.45	0.0069
0	20	9	22	0	23	10195	97.28	93.18	0.0075
0	20	10	22	0	24	10499	97.20	93.04	0.0046
0	20	7	17	0	24	11024	96.25	92.55	0.0024
0	20	5	18	0	24	11324	95.72	91.97	0.0032
20	0	9	1	0	13	11047	98.39	93.85	0.0024
20	0	8	0	0	12	11230	98.00	93.83	0.0032
20	0	8	0	0	14	11401	98.14	93.89	0.0087

最后,可以发现表 4、表 5 中光源的  $R_v$  值均非常接近,为了验证高光色品质光源和高色温光源光谱视觉相似度参数  $R_v$  有差别,通过 SPSS 软件进行成对样本统计学显著性分析,分析结果如表 6、表 7 所示。表 6 和表 7 中  $N$  表示样本数量,本统计的样本数量为 12。

表 6 成对样本统计量

Table 6 Paired sample statistics

Standard error mean	Item	Mean	$N$	Standard deviation
$R_v$ of LED with high light-color property	96.8158	12	0.81633	0.23565
$R_v$ of LED with high CCT	93.6450	12	0.87712	0.25320

表 7 成对样本相关系数

Table 7 Paired sample correlation coefficients

Item	$N$	Correlation	Significance
$R_v$ of LED with high light-color property & $R_v$ of LED with high CCT	12	-0.796	0.002

统计学显著性分析结果显示,显著性水平为 0.002,  $P < 0.05$  说明结果具有统计学意义,可认为两组差别明显。

## 5 参考光源的选择问题

采用光谱视觉相似度参数  $R_V$  进行高光色品质照明光源参数设计,比采用一般显色指数  $R_a$  和相关色温  $T_c$  两个参数进行设计具有明显的优点,首先是单一参数指标降低了设计的复杂性,其次是  $R_V$  的计算方法简单,大大减少了计算量。与一般显色指数  $R_a$  的计算需要选择参考光源一样,光谱视觉相似度参数  $R_V$  的计算也与参考光源的选取有关。由于等能光谱(标准照明体 E)光源难以获得,实际设计高光色品质光源时可以采用 CIE 推荐的标准光源作为参考光源,标准光源 A、D50、D55、D65、D75 可以用于不同色温要求的高光色品质光源设计,本研究采用 D50 作为参考光源是基于光生物安全考虑,D55、D65、D75 标准光源的蓝光成分较多,在亮度较高时作为照明光源可能对视网膜造成光化学危害,而标准光源 A 的红光和红外成分多,在亮度较高时容易造成视网膜热危害。图 7 给出了将表 3 和表 5 中的 LED 合成光源采用不同参考光源计算得到的  $R_V$ 、 $T_c$  和  $R_a$  的关系曲线,可以看到参考光源的选取对计算结果有一定影响,若取  $R_V > 96$  为参考指标,则当采用 CIE 标准光源 D50 作为参考光源时,如图 7(a)所示,满足条件的色温范围为 4000~7000 K,同时满足显色指数  $R_a > 95$ ,符合健康照明白光光源要求;当采用 CIE 标准光源 D65 作为参考光源时,如图 7(b)所示,此时满足条件的色温范围为 5500~11300 K,同时满足显色指数  $R_a > 95$ ,可用于设计高色温区高显色性光源;当采用标准光源 A 作为参考光源时,如图 7(c)所示,此时满足条件的色温范围为 3800~4000 K,同时满足显色指数  $R_a > 95$ ,可用于设计低色温区高显色性光源。因此,根据照明光源的色温要求,通过选择不同 CIE 标准光源作为参考光源,采用光谱视觉相似度参数  $R_V$  进行高光色品质照明光源参数设计可以得到不同色温范围的照明光源,本研究基于光生物安全考虑,选择 CIE 标准光源 D50 作为参考光源,设计的高光色品质照明光源色温范围为 4000~7000 K。

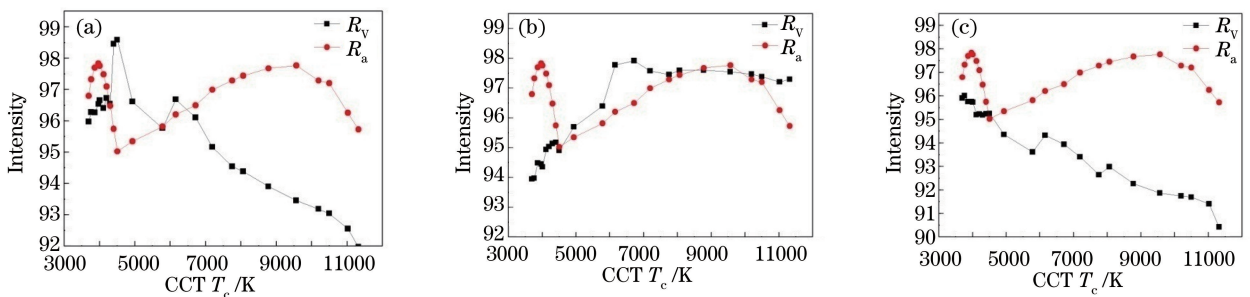


图 7 不同参考光源的光谱视觉相似度参数  $R_V$  与显色指数  $R_a$  的比较。(a) D50;(b) D65;(c) A

Fig. 7 Comparison of spectral visual similarity  $R_V$  and color rendering index  $R_a$  under different reference sources. (a) D50; (b) D65; (c) A

## 6 结 论

针对现有高显色指数 LED 室内照明光源仍然存在富蓝光危害的问题,基于人眼光谱光视效率、辨色函数和光强主观感受对数函数响应特性,建立了被测光源光谱与参考光源光谱的视觉相似度模型,提出一种以光谱视觉相似度参数  $R_V$  评价照明光源光色品质的新方法,并以此评价参数  $R_V$  为依据,采用 CIE 推荐的标准光源 D50 作为参考光源,设计了高光色品质的 LED 合成白光光源,通过 6 种 LED 的选择性组合,得到  $R_V > 96$  的高光色品质 LED 合成光源。结果表明,合成光源的相关色温范围为 4000~7000 K,一般显色指数  $R_a > 95$ ,属于高光色品质白光,符合健康照明要求,证明了以 CIE 推荐的标准光源 D50 作为参考光源,采用光谱视觉相似度参数  $R_V > 96$  设计高光色品质健康照明光源的合理性和正确性。进一步分析表明,选择不同色温的 CIE 标准光源作为参考光源,可以设计不同色温要求的高显色性白光。采用光谱视觉相似度参数  $R_V$  进行高光色品质照明光源参数设计,具有方法简单、计算量少等显著优点。

## 参 考 文 献

- [1] Borisuit A, Linhart F, Scartezzini J L, *et al.* Effects of realistic office daylighting and electric lighting conditions on visual comfort, alertness and mood[J]. *Lighting Research & Technology*, 2014, 47(2): 192-209.

- [2] Gu Fangbo, Zhu Tengfei, Qian Feng, *et al.* Analysis of photobiological safety of indoor LED spotlights[J]. Journal of China University of Metrology, 2014, 25(3): 332-336.  
顾芳波, 朱腾飞, 钱枫, 等. 室内LED射灯光生物安全分析[J]. 中国计量学院学报, 2014, 25(3): 332-336.
- [3] Shen Chongyu, Xu Zheng, Zhao Suling, *et al.* Study on the safety of blue light leak of LED[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014(2): 316-321.  
申崇渝, 徐征, 赵谡玲, 等. LED蓝光泄露安全性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014(2): 316-321.
- [4] Boyce P R. Review: the impact of light in buildings on human health[J]. Indoor & Built Environment, 2010, 19(1): 8-20.
- [5] Liu Na, He Zhongkai, Cai Zhiqiang, *et al.* Safety test of light-emitting diode (blue) light to rat retina[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2009, 13(48): 9559-9562.  
刘娜, 何仲恺, 蔡志强, 等. 蓝色发光二极管光源照射对大鼠视网膜的安全性试验[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, 13(48): 9559-9562.
- [6] LED measurement series: color rendering index and LEDs [EB/OL]. [https://www.energystar.gov/ia/partners/prod\\_development/new\\_specs/downloads/integral\\_leds/Nexxus\\_Commercial\\_Lighting\\_2\\_IntegralLEDLampCommentsDraft2.pdf?fe0e-fa8d](https://www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/new_specs/downloads/integral_leds/Nexxus_Commercial_Lighting_2_IntegralLEDLampCommentsDraft2.pdf?fe0e-fa8d).
- [7] Narendran N, Deng L. Color rendering properties of LED light sources[C]. SPIE, 2002, 4776: 61-67.
- [8] Zhang Fuzheng, Xu Haisong, Wu Xiaomin, *et al.* Towards universal evaluation method for color quality of light sources[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0833001.  
章夫正, 徐海松, 吴晓玫, 等. 面向光源颜色质量普适评价方法的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0833001.
- [9] Hu Weijie, Tang Shunqing, Zhu Zhengfang. Modern color science and application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007.  
胡威捷, 汤顺青, 朱正芳. 现代颜色技术原理及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- [10] Hu Zhixiong, Wang Zuogang. A quantitative description of the spectral response of the human eye[J]. Journal of Wenzhou Medical College, 1991(4): 219-223.  
胡志雄, 王佐刚. 人眼光谱响应的定量描述[J]. 温州医学院学报, 1991(4): 219-223.
- [11] Chen Zhihui. Design of Light Sensor using algorithm matching to human eyes[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.  
陈志辉. 一种应用适应人眼特性算法的Light Sensor设计[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [12] Yao Qi, Hu Yanpeng, Heng Tao, *et al.* Comprehensive analysis of the effect of blue-light wavelength[J]. Lamps & Lighting, 2013(1): 10-11.  
姚其, 胡艳鹏, 衡涛, 等. 光源蓝光波长效应的综合分析[J]. 光源与照明, 2013(1): 10-11.
- [13] Xia Richeng. Colormaps designing based on colorful and gray image[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007.  
夏日诚. 基于彩色和灰度图像的色图设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- [14] Robertson P K. Visualizing color gamuts: a user interface for the effective use of perceptual color spaces in data displays[J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 1988, 8(5): 50-64.
- [15] Wang Zhehong, Xu Haisong. Evaluation of color-difference formulae based on the correlation between visual tolerances and hue angles[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1838-1841.  
汪哲弘, 徐海松. 基于视觉容差与色调角相关性的色差公式评价[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1838-1841.
- [16] Song Pengcheng, Wen Shangsheng, Chen Yingcong. Research on color mixing based on RGBW-LEDs[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0923004.  
宋鹏程, 文尚胜, 陈颖聪. 基于RGBW四色LED的混光研究[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0923004.
- [17] Mei Jianjian, Liu Lilan. Research on corrected color temperature deviation of white light based on tricolor light LEDs[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0833001.  
梅健健, 刘丽兰. 基于三基色LED的白光色温偏差研究[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0833001.
- [18] Yao Qi. Spectral efficiency performance optimization research on three-chips of LED[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 083003.  
姚其. 三芯片LED光谱效率性能优化研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 083003.
- [19] Hu Yibin, Zhuang Qiren, Liu Shiwei, *et al.* Study on LEDs synthesized high color rendering index white light source



- [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0323003.
- 胡奕彬, 庄其仁, 刘士伟, 等. 高显色指数 LED 合成白光光源的研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0323003.
- [20] International Electrotechnical Commission. IEC/TR 62778: Application of IEC 62471 for the assessment of blue light hazard to light source and luminaries[R]. IEC, 2012.
- [21] 全国照明电器标准化技术委员会. GB/T 20145-2006, 灯和灯系统的光生物安全性[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [22] Rao Feng, Wu Xiaocheng, Wang Yajing, *et al.* Determining the blue light hazard of phosphor converted LED with irradiance and color temperature[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(32): 121-123.
- 饶 丰, 吴晓程, 王雅静, 等. 用亮度和色温测算 LED 蓝光危害[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(32): 121-123.