

激光与光电子学进展

基于中视觉的亮度可调白光 LED 光谱优化

里荣博, 王智峰*, 徐杨**, 李长军

辽宁科技大学计算机与软件工程学院, 辽宁 鞍山 114051

摘要 已有用蓝光发光二极管(LED)激发绿橙双色荧光粉的荧光粉涂覆型白光LED的中视觉发光效率最大化光谱优化问题,目标函数为最大化多个亮度水平下的平均中视觉发光效率,该优化模型是对相关色温(CCT)进行离散穷举,仅能获得固定色温下不同亮度水平的平均中视觉发光效率最大值。为了在不同亮度水平下获得最大中视觉发光效率,提出了一种目标函数简单的非线性约束优化模型,同时将CCT作为在一定范围内变化的优化参数。实验结果表明,该模型可以在满足显色指数、色彩保真度和给定中视觉亮度水平的要求下,获得最优的LED光谱,真正实现在指定亮度水平下中视觉发光效率最大化的目的。

关键词 视觉光学; 发光二极管; 显色指数; 色彩保真度; 中视觉; 亮度可调; 发光效率

中图分类号 TN312+.8

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1133001

Spectral Optimization of White LED with Brightness Adjustable Based on Mesopic Vision

Li Rongbo, Wang Zhifeng*, Xu Yang**, Li Changjun

College of Computer and Software Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning, China

Abstract A spectrum optimization problem of maximizing the mesopic visual luminous efficiency of phosphor-coated white light-emitting diodes (LED) by exciting green and orange phosphors with a blue LED. The objective function is to maximize the average mesopic visual luminous efficiency at multiple brightness levels. The optimization model for correlated color temperature (CCT) is discrete and exhaustive, and it can only maximize the average mesopic visual luminous efficiency for varied brightness levels under a constant color temperature. A nonlinear constrained optimization model with a simple objective function is suggested in this study to attain the maximum mesopic visual luminous efficiency at varied brightness levels, and the CCT is considered an optimization parameter varying in a specific range. The experimental results show that the model can obtain the optimal LED spectrum, while meeting the requirements of color rendering index, color fidelity, and a given mesopic visual brightness level, and that it truly achieves the purpose of maximizing the medium visual luminous efficiency under the specified brightness level.

Key words visual optics; light-emitting diode; color rendering index; color fidelity; mesopic vision; brightness adjustable; luminous efficiency

1 引言

随着发光二极管(LED)技术的飞速发展,LED

因其节能环保、寿命长、发光效率高和亮度可调等特点,逐渐取代传统照明光源成为当前主流的照明光源^[1]。国内研究人员对白光LED进行了深入探

收稿日期: 2021-06-24; 修回日期: 2021-07-02; 录用日期: 2021-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(61575090, 61775169)、辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0267)、辽宁省教育厅项目(2020LNJC01)

通信作者: *wangzhifeng_sia@126.com; **xuyang_1981@aliyun.com

索^[2-4],从发光效率、色温、显色指数等方面对白光 LED 光谱进行了优化。

中视觉状态下的人眼视觉功能与明视觉和暗视觉状态下的人眼视觉功能有明显差异^[5]。大多数 LED 光谱优化的研究中,白光 LED 的发光效率都是基于明视觉计算^[6-8],而白光 LED 的照明环境大多处于中视觉亮度水平下(0.005~5 cd/m²),因此,以明视觉发光效率对 LED 光谱进行优化会存在一定偏差。Zan 等^[9]以最大化多个中视觉亮度下的平均中视觉发光效率为优化目标,模拟计算了量子点白光 LED 在 17 个不同色温的中视觉极限发光效率和光谱组合。Xiao 等^[10]以 4 种亮度水平下最大化符合美国和英国道路照明标准的平均中视觉发光效率为优化目标,模拟计算了蓝光 LED 激发绿橙双色荧光粉的白光 LED 在 2700~6500 K 范围内 8 个不同色温的中视觉极限发光效率和光谱组合。已有模型基本都是在固定色温下进行优化,而在很多照明应用中(如道路照明),色温并不是重要指标(在一定范围内即可),但由于所处光环境的详细划分,对光源的亮度要求逐渐增大^[11]。因此,在规定色温范围内,探索高显色性和中视觉下高发光效率的亮度可调白光 LED^[12-14]具有重要意义。

本文提出了一种亮度可调白光 LED 的光谱优化模型,并以符合美国和英国道路照明标准的 4 种亮度为例,模拟计算了显色指数(R_a)^[15]和色彩保真度(R_f)^[16]均大于 70、80、90,色温在 2700~6500 K 范围时,4 种中视觉亮度下蓝光 LED 激发绿橙双色荧光粉的荧光粉涂覆型白光发光二极管(pc-WLED)中视觉极限发光效率和对应的光谱组合。

2 亮度可调白光 LED 光谱的优化方法

实际道路照明应用中的亮度水平往往介于中视觉亮度范围内,即 0.005~5 cd/m²之间^[17]。Xiao 等^[10]基于显色指数 R_a 和色彩保真度 R_f 探索了符合美国和英国 4 种道路照明标准下蓝光 LED 激发绿橙荧光粉的 pc-WLED 光谱优化问题。采用文献[10]中的白光 LED 光谱模型,即蓝光 LED 激发绿橙双色荧光粉的 pc-WLED 光谱功率分布 $S_w(\lambda)$,可表示为

$$S_w(\lambda) = \varphi_b S(\lambda, \lambda_b, \Delta\lambda_b) + \varphi_g S(\lambda, \lambda_g, \Delta\lambda_g) + \varphi_{or} S(\lambda, \lambda_{or}, \Delta\lambda_{or}), \quad (1)$$

式中, $S(\lambda, \lambda_b, \Delta\lambda_b)$ 、 $S(\lambda, \lambda_g, \Delta\lambda_g)$ 和 $S(\lambda, \lambda_{or}, \Delta\lambda_{or})$ 分别为蓝光 LED、绿色荧光粉和橙色荧光粉的相对光

谱功率分布, φ_b 、 φ_g 和 φ_{or} 分别为各成分光谱的系数, λ_b 、 λ_g 和 λ_{or} 分别为各成分光谱的峰值波长, $\Delta\lambda_b$ 、 $\Delta\lambda_g$ 和 $\Delta\lambda_{or}$ 分别为各成分光谱的半峰全宽(FWHM), λ 为波长范围。蓝光 LED 光谱的峰值波长在 450~470 nm 之间,绿色荧光粉光谱的峰值波长在 500~550 nm 之间,橙色荧光粉光谱的峰值波长在 580~620 nm 之间。蓝光 LED 光谱的 FWHM 在 25~35 nm 之间,绿色和橙色荧光粉光谱的 FWHM 在 70~120 nm 之间。此外,蓝光 LED 光谱采用 Ohno^[18]给出的修正高斯分布模型,将绿橙荧光粉光谱近似为高斯分布^[19]。

国际照明委员会(CIE)在 2010 年推荐了基于视觉性能的中视觉光度测量 MES2 模型^[20],可表示为

$$M(m) V_{mes}(\lambda) = mV(\lambda) + (1-m) V'(\lambda), \quad 0 \leq m \leq 1, \quad (2)$$

$$L_{mes} = \frac{K_m}{V_{mes}(\lambda_0)} \int_{\lambda} V_{mes}(\lambda) S_w(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

式中, $V_{mes}(\lambda)$ 为中视觉光谱的光视效率函数, $V(\lambda)$ 为明视觉光谱的光视效率函数, $V'(\lambda)$ 为暗视觉光谱的光视效率函数, λ_0 为 555 nm, $M(m)$ 为能使 $V_{mes}(\lambda)$ 最大值规格化为 1 的函数, L_{mes} 为中视觉亮度, $K_m = 683 \text{ lm/W}$ 为明视觉下的最大光谱发光效率, m 为视觉适应度系数。由 CIE 的 MES2 模型可知,适应度系数 m 满足非线性方程

$$F(m) = \frac{mL_p + (1-m)L_s(K_m/K'_m)}{m + (1-m)(K_m/K'_m)} - 10^{\frac{m-a}{b}} = 0, \quad (4)$$

$$L_{mes} = \frac{mL_p + (1-m)L_s(K_m/K'_m)}{m + (1-m)(K_m/K'_m)}, \quad (5)$$

$$m = a + b \log_{10}(L_{mes}), \quad (6)$$

其中,

$$L_p = K_m \int_{\lambda} S_w(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

$$L_s = K'_m \int_{\lambda} S_w(\lambda) V'(\lambda) d\lambda, \quad (8)$$

$$a = 0.7670, \quad b = 0.3334, \quad (9)$$

式中, $K'_m = 1699 \text{ lm/W}$ 为暗视觉下的最大光谱发光效率, L_p 、 L_s 分别为明视觉亮度和暗视觉亮度。

Gao 等^[21]发现式(4)可能无解或有多个解,并给出了该非线性方程存在唯一解时对应的参数 a 和 b ,可表示为

$$a = 1 - \log_{10}(5) / 3, \quad b = 1/3. \quad (10)$$

$$\varphi_{ab} = \frac{\varphi_g \int_{\lambda} S(\lambda, \lambda_g, \Delta\lambda_g) \lambda d\lambda + \varphi_{or} \int_{\lambda} S(\lambda, \lambda_{or}, \Delta\lambda_{or}) \lambda d\lambda}{\int_{\lambda} S(\lambda, \lambda_b, \Delta\lambda_b) \lambda d\lambda}, \quad (11)$$

$$B = \int_{\lambda} (\varphi_b + \varphi_{ab}) S(\lambda, \lambda_b, \Delta\lambda_b) d\lambda, \quad (12)$$

则包含降频能量损失^[22]的中视觉发光效率可表示为

$$E_{mes} = L_{mes} / B. \quad (13)$$

当中视觉亮度固定时,使中视觉发光效率 E_{mes} 最大等价于使 B 最小,从而将亮度可调情况下优化光谱 $S_w(\lambda)$ 的问题转化为在给定的色温范围内不同中视觉亮度以及特定要求下寻找 B 的最小值问题,因此将本方法称为亮度可调白光LED极小化辐射亮

度优化方法,简称为极小化 B 优化法。由式(13)可知, B 为辐射亮度,单位为 $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$,且 B 为9个参数的函数。本方法中非线性约束优化模型的最小化目标函数为 $B(\varphi_b, \varphi_g, \varphi_{or}, \lambda_b, \lambda_g, \lambda_{or}, \Delta\lambda_b, \Delta\lambda_g, \Delta\lambda_{or})$,约束条件可表示为

$$\begin{cases} T_s \leq X_{CCT} \leq T_e, & D_{uv} \leq 0.0054 \\ R_a \geq Q, & R_f \geq Q \\ L_p < 5.0, & L_s > 0.005, & L_{mes} = L_i \end{cases}, \quad (14)$$

式中, X_{CCT} 为pc-WLED光谱功率分布 $S_w(\lambda)$ 的CCT, T_e 、 T_s 分别为色温范围的上限和下限, Q 为给定的显色指数和色彩保真度的下限值, D_{uv} 为 $S_w(\lambda)$ 与CIE 1960 UCS色度空间(uv)上黑体轨迹或日光轨迹的色度差。 L_i 为不同的中视觉亮度。由式(13)和式(5),得到

$$E_{mes} = \frac{L_{mes}}{B} = \frac{m + (1 - m)(L_s/L_p)(683/1699)}{m + (1 - m)(683/1699)} \frac{L_p}{B}, \quad 0 < m < 1. \quad (15)$$

基于式(15),Xiao等^[10]提出符合美国和英国道路照明标准的4种亮度水平,pc-WLED光谱优化模型对应的 L_{mes} 分别为0.50、0.80、1.25、1.75 cd/m^2 。当 $L_{mes} = L_i$ 时,由式(6)可计算出视觉适应度系数 m_i 。令

$$E_{mes,ave} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \frac{m_i + (1 - m_i)(L_s/L_p)(683/1699)}{m_i + (1 - m_i)(683/1699)} \times \frac{L_p}{B}, \quad (16)$$

文献[10]的优化模型是在不同CCT下,使式(16)中的 $E_{mes,ave}$ 达到最大,且

$$D_{uv} \leq 0.0054, R_a \geq Q, R_f \geq Q. \quad (17)$$

文献[10]中的优化模型是通过确定一个光谱曲线适应多个亮度水平,但其目标函数是使4种亮度水平下中视觉发光效率的平均值最大,不能确保在每个亮度水平下都达到最大中视觉发光效率。此外,该优化模型是在固定CCT条件下寻求最优,本质上是对色温的离散穷举,虽然在每个固定的CCT上都可得到最优的光谱组合,但不一定是在一定色温范围内的最优解,且本模型的目标函数比文献[10]中模型的目标函数更简单。

3 结果与讨论

实验在Matlab平台进行,非线性规划算法使用Matlab内置的函数fmincon,并对options变量进行设置。设置最优值点 x 处的终止阈值TolX为 10^{-10} ,函

数值的终止阈值TolFun为 10^{-10} ,函数评价的最大次数MaxFunEvals为 10^4 。选取的波长范围为380~780 nm,色温范围为2700~6500 K,显色指数和色彩保真度的下限值 Q 分别为70、80、90,选取满足美国和英国道路照明标准的4种亮度水平作为给定的亮度,对应的 L_{mes} 分别为0.50、0.80、1.25、1.75 cd/m^2 。由式(6)可计算出视觉适应度系数 m_i ,再由式(2)计算中视觉光谱光视效率函数 $V_{mes}(\lambda)$ 。图1为4种亮度水平下的中视觉光谱光视效率函数,可以发现,随着亮度水平的增加,函数峰值位置逐渐向长波长方向移动。

表1~表3为显色指数 R_a 和色彩保真度 R_f 均大

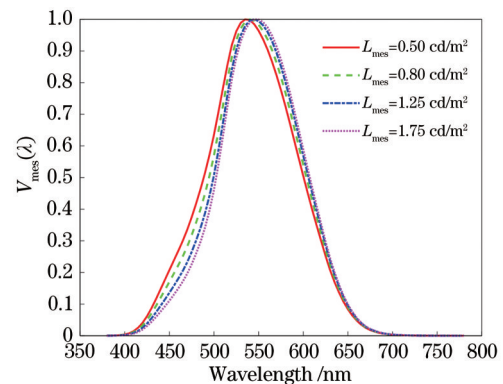


图1 4种亮度水平对应的中视觉光视效率函数
Fig. 1 Mesopic luminous efficiency functions for 4 luminance levels

表 1 Q=70 时 pc-WLED 的光谱最优化结果

Table 1 Spectral optimization results of pc-WLED when Q=70

$L_{mes} / (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	0.50	0.80	1.25	1.75
CCT / K	5216	4572	3945	3720
D_{uv}	5.40×10^{-3}	5.40×10^{-3}	5.40×10^{-3}	5.40×10^{-3}
φ_b	1.29×10^{-5}	1.79×10^{-5}	2.33×10^{-5}	2.97×10^{-5}
φ_g	3.77×10^{-6}	6.88×10^{-6}	1.04×10^{-5}	1.49×10^{-5}
φ_{or}	7.61×10^{-6}	1.29×10^{-5}	2.29×10^{-5}	3.32×10^{-5}
λ_b / nm	468.6586	466.9254	468.3579	467.9766
λ_g / nm	522.9684	529.3205	528.3368	530.3253
λ_{or} / nm	589.5937	593.0800	594.7150	596.1191
$\Delta\lambda_b / \text{nm}$	25	25	25	25
$\Delta\lambda_g / \text{nm}$	70	70	70	70
$\Delta\lambda_{or} / \text{nm}$	70	70	70	70
R_f	71.8523	71.8877	71.5228	71.1791
R_a	70.0002	70.3140	70.0001	70.0002
$B / (\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$	1.39×10^{-3}	2.31×10^{-3}	3.69×10^{-3}	5.25×10^{-3}
$E_{mes} / (\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$	360.5220	347.0699	338.7914	333.5772

表 2 Q=80 时 pc-WLED 的光谱最优化结果

Table 2 Spectral optimization results of pc-WLED when Q=80

$L_{mes} / (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	0.50	0.80	1.25	1.75
CCT / K	5585	4749	4127	3861
D_{uv}	5.40×10^{-3}	5.40×10^{-3}	5.40×10^{-3}	5.40×10^{-3}
φ_b	1.20×10^{-5}	1.63×10^{-5}	2.21×10^{-5}	2.83×10^{-5}
φ_g	5.23×10^{-6}	8.75×10^{-6}	1.36×10^{-5}	1.91×10^{-5}
φ_{or}	6.80×10^{-6}	1.25×10^{-5}	2.14×10^{-5}	3.17×10^{-5}
λ_b / nm	464.0256	465.5570644	465.0608	465.355
λ_g / nm	523.463	521.3666092	527.0071	528.2519
λ_{or} / nm	596.773	599.1442283	601.1349	602.2257
$\Delta\lambda_b / \text{nm}$	25	25	25.0013	25
$\Delta\lambda_g / \text{nm}$	70	70	70.0004	70
$\Delta\lambda_{or} / \text{nm}$	70	70	70.0001	70
R_f	81.5266	81.7754	81.0385	81.1049
R_a	80.0004	79.9999	80.0000	80.0001
$B / (\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$	1.43×10^{-3}	2.39×10^{-3}	3.83×10^{-3}	5.46×10^{-3}
$E_{mes} / (\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$	350.3037	335.1380	326.4837	320.6321

于 70、80、90, pc-WLED 在 2700~6500 K 色温范围内 4 种中视觉亮度水平(0.50、0.80、1.25、1.75 cd/m²) 下 B 的极小值、对应的 E_{mes} 和最佳光谱参数。可以发现:固定 Q 值时,随着亮度水平的增加,中视觉极限发光效率逐渐减少;固定亮度水平时,随着 Q 值的增大(显色指数和色彩保真度的增加),中视觉极限发光效率逐渐减少。图 2 为 Q 分别为 70、80、90 时本模型(PM)与文献[10]中模型(XM)中视觉极

限发光效率随中视觉亮度 L_{mes} 的变化曲线。从表 1 可以发现:当 Q=70 时,0.50、0.80、1.25、1.75 cd/m² 亮度水平下的中视觉极限发光效率分别为 361、347、339、334 lm/W。按文献[10]中的平均中视觉发光效率最大化优化模型进行优化,在色温为 5000 K 时得到最优结果,即优化光谱的平均中间视觉发光效率最大,该色温下 4 种不同亮度水平下的中视觉发光效率分别为 359、346、335、328 lm/W。对比发

表 3 Q=90 时 pc-WLED 的光谱优化结果

Table 3 Spectral optimization results of pc-WLED when Q=90

$L_{mes} / (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	0.50	0.80	1.25	1.75
CCT / K	5928	5293	4429	4165
D_{uv}	5.40×10^{-3}	5.40×10^{-3}	5.40×10^{-3}	5.40×10^{-3}
φ_b	1.10×10^{-5}	1.67×10^{-5}	2.17×10^{-5}	2.80×10^{-5}
φ_g	6.40×10^{-6}	1.05×10^{-5}	1.65×10^{-5}	2.33×10^{-5}
φ_{or}	6.41×10^{-6}	1.13×10^{-5}	2.02×10^{-5}	2.99×10^{-5}
λ_b / nm	456.9384	458.0459	459.3153	459.0125
λ_g / nm	521.5658	523.7809	526.4029	527.1908
λ_{or} / nm	603.0222	605.0161	607.8438	608.4379
$\Delta\lambda_b / \text{nm}$	25.0002	25.0006	25.0000	25.0000
$\Delta\lambda_g / \text{nm}$	70.0002	70.0004	70.0000	70.0000
$\Delta\lambda_{or} / \text{nm}$	70.0000	70.0002	70.0000	70.0000
R_t	90.0000	90.0002	90.0038	90.0000
R_s	90.00007	90.0001	90.0002	90.0000
$B / (\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$	1.48×10^{-3}	2.48×10^{-3}	4.01×10^{-3}	5.73×10^{-3}
$E_{mes} / (\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$	337.1321	322.9773	311.8117	305.4343

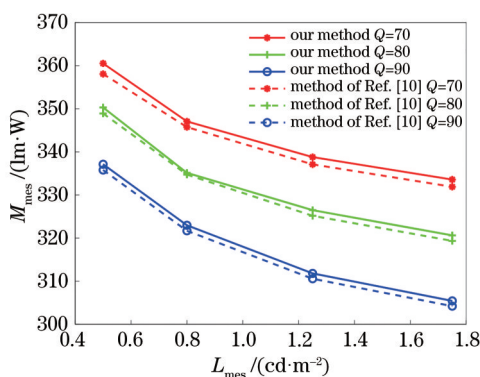


图 2 中视觉极限发光效率随中视觉亮度的变化曲线
Fig. 2 Variation curve of mesopic limit luminous efficiency with mesopic brightness

现,本方法获得的结果优于文献[10]中的方法。此外,当Q=80和90时会得到相同的结论。原因是文献[10]中的结果是通过CCT穷举法获得,很难得到最优色温,而本方法将固定色温改为2700~6500 K范围内的色温,从而得到最优色温以及对应的最大中视觉发光效率。

在相同Q值下最小B值随中视觉亮度 L_{mes} 的增大而增大,相应的中视觉极限发光效率 E_{mes} 随之降低。但在相同亮度水平下,随着Q值的增大,最小B值也逐渐增大,相应的中视觉极限发光效率 E_{mes} 随之降低。图3为 φ_{ab} 随中视觉亮度和Q值的变化趋势。可以发现, φ_{ab} 随中视觉亮度或Q值的增而增加,即蓝色LED被绿橙荧光粉吸收的能量增加,降频能量损失也增加,从而使中视觉极限发光效率降低。

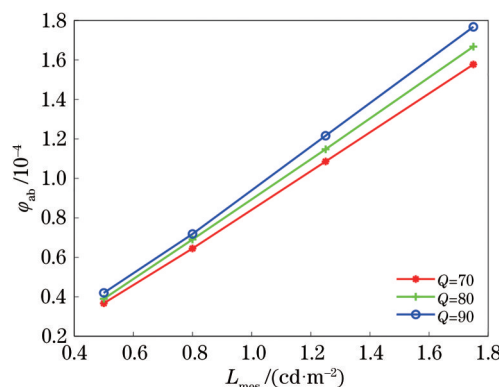


图 3 φ_{ab} 随 L_{mes} 的变化曲线
Fig. 3 Variation curve of φ_{ab} with L_{mes}

从仿真结果可以发现,固定Q值时,随着亮度水平的增加,得到的组合光谱相关色温会逐渐降低。原因是随着中视觉亮度的增加,对应的中视觉光谱光视效率函数逐渐朝长波长方向移动。为了达到最大中视觉发光效率,需要适当增加长波范围的光谱比例,减少短波范围的光谱比例,即增加绿光和橙光成分所占比例,减少蓝光成分所占比例,从而降低光谱的相关色温。固定亮度水平时,相关色温随Q值的增加逐渐增加,B值也随之增大,相应的中视觉极限发光效率随之降低,原因是随着显色性和保真度的增加,光谱需要更分散,以满足更高显色性和保真性的要求,从而增加了合成光谱中绿色光和橙色光的比例,导致绿橙荧光粉吸收的蓝光能量增加, φ_{ab} 和降频能量损失也有所增加。图4为相关色温随亮度水平和Q值的变化曲线。

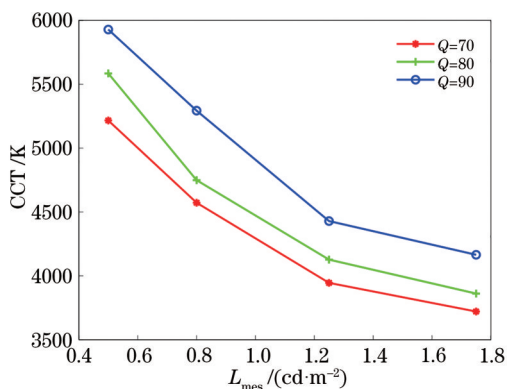


图 4 CCT 随 L_{mes} 的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of CCT with L_{mes}

图 5~图 7 分别为 $Q=70, 80, 90$, 色温在 2700~6500 K 范围时, 4 种中视觉亮度下最佳光谱的相对光谱功率分布。从图 5 可以发现: 在不同亮度水平下, 最优光谱曲线有 2 个峰值; 左侧峰值波长在不同亮度水平相同, 而右侧峰值波长随着亮度水平的增

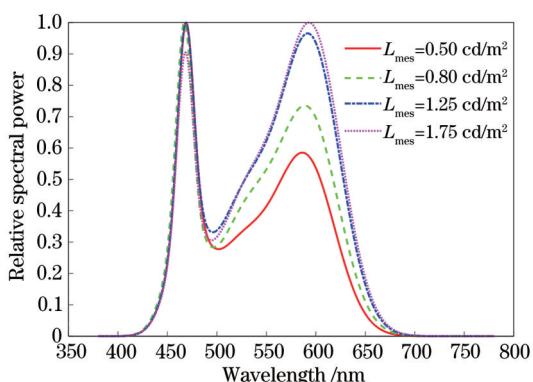


图 5 $Q=70$ 时 4 种中视觉亮度的最佳光谱相对功率

Fig. 5 Optimal spectral relative power of 4 mesopic visual brightness when $Q=70$

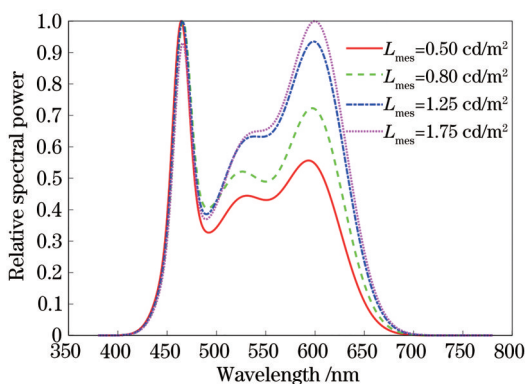


图 6 $Q=80$ 时 4 种中视觉亮度的最佳光谱相对光谱功率

Fig. 6 Optimal spectral relative power of 4 mesopic visual brightness when $Q=80$

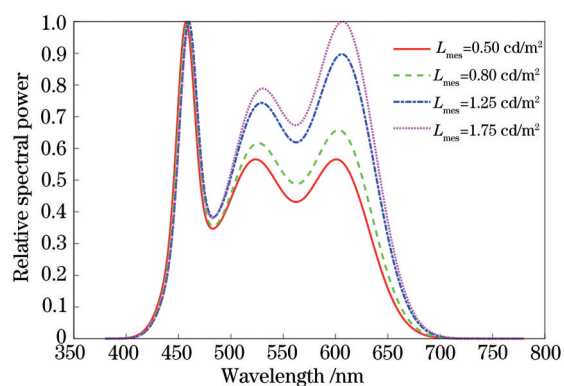


图 7 $Q=90$ 时 4 种中视觉亮度的最佳光谱相对光谱功率

Fig. 7 Optimal spectral relative power of 4 mesopic visual brightness when $Q=90$

加逐渐向长波方向移动, 原因是随着亮度水平的增加, 中视觉光谱光视效率函数向长波方向偏移。图 6 中也出现了这种现象, 且光谱曲线在两个峰之间倾向于出现第 3 个波峰, 但不明显。图 7 中的最优光谱清晰出现了 3 个波峰, 中间波峰的峰值较低。原因是当对白光的显色性与保真度要求增大时, 合成的白光光谱需要分布得更广, 才能满足更高显色性和保真度的要求, 导致中间区域的波峰会愈加明显。

4 结 论

针对亮度可调白光 LED 的光谱优化, 提出了在给出色温范围内不同中视觉亮度水平下的白光 LED 光谱优化方法, 即亮度可调白光 LED 极小化辐射亮度优化法。实验结果表明, 相比文献 [10] 中的方法, 本方法得到的最优光谱在各亮度下的中视觉极限发光效率更高, 且目标函数更简单, 更适用于对亮度有明确要求的亮度可调白光 LED 光谱优化。此外, 在相同显色性和保真度要求下, pc-WLED 的中视觉极限发光效率和对应的相关色温随中视觉亮度的增加而降低; 在相同中视觉亮度下, pc-WLED 的中视觉极限发光效率随显色性和保真度要求的上升而降低, 而相关色温随显色性和保真度要求的上升而增加。本研究为高发光效率的亮度可调白光 LED 设计提供了一定的理论指导。

参 考 文 献

[1] 黎兆林. LED 照明新一代的绿色光源[J]. 广西节能, 2007(4): 34-35.
Li Z L. A new generation of green light source for LED lighting[J]. Guangxi Jieneng, 2007(4): 34-35.

- [2] 王宏民, 唐帆, 薛萍. 基于单色 LED 的太阳光谱合成方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 093004.
Wang H M, Tang F, Xue P. A solar spectrum synthesis method based on monochrome LED[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 093004.
- [3] 周孟欣, 朱大庆, 廖欣怡. LED 光源的光谱与色域面积关系[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 232302.
Zhou M X, Zhu D Q, Liao X Y. Relationship between spectrum and color gamut area of LED light sources[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 232302.
- [4] 付祥恩, 杨飞宇, 唐宇. 基于激基复合物的白有机发光二极管[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 212303.
Fu X E, Yang F Y, Tang Y. White organic light-emitting diodes with high color-rendering index based on exciplex[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 212303.
- [5] TC CIE. Mesopic photometry: history, special problems, and practical solutions[EB/OL]. [2021-06-04]. <https://cie.co.at/publications/mesopic-photometry-history-special-problems-and-practical-solutions>.
- [6] 郭自泉, 高玉琳, 吕毅军, 等. 固定相关色温下三基色合成白光 LED 的光谱优化[J]. 光电子·激光, 2011, 22(7): 992-996.
Guo Z Q, Gao Y L, Lü Y J, et al. Spectrum optimization of tri-color white LEDs at fixed correlated color temperature[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2011, 22(7): 992-996.
- [7] Yao Q. Application-dependent spectrum optimization of four-package LEDs[J]. Lighting Research & Technology, 2016, 48(7): 844-856.
- [8] Zhang J J, Hu R, Yu X J, et al. Spectral optimization based simultaneously on color-rendering index and color quality scale for white LED illumination[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 88: 161-165.
- [9] Zan L L, Lin D Y, Zhong P, et al. Optimal spectra of white LED integrated with quantum dots for mesopic vision[J]. Optics Express, 2016, 24(7): 7643-7653.
- [10] Xiao L C, Zhang C W, Zhong P, et al. Spectral optimization of phosphor-coated white LED for road lighting based on the mesopic limited luminous efficacy and IES color fidelity index[J]. Applied Optics, 2018, 57(4): 931-936.
- [11] 李景色. 机动车和人行交通道路照明的建议[J]. 照明工程学报, 2005, 16(1): 56-62.
Li J S. Recommend actions for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2005, 16(1): 56-62.
- [12] Qin Z, Shen Y H, Meng W W, et al. An adjustable brightness LED driver with high efficiency, high stability and low power consumption[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10843: 108431G.
- [13] 吴金华. 一种多光谱亮度可调的 LED 光照系统[J]. 照明工程学报, 2016, 27(3): 17-21.
Wu J H. A LED lighting system with multi-spectral and adjustable intensity[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2016, 27(3): 17-21.
- [14] 许向阳, 陈广学, 高媛. 色温及亮度可调的四基色 LED 混合白光的方法研究[J]. 影像科学与光化学, 2018, 36(6): 507-513.
Xu X Y, Chen G X, Gao Y. Research on four primary color LED hybrid white light with brightness continuous adjustable under different color temperature [J]. Imaging Science and Photochemistry, 2018, 36(6): 507-513.
- [15] Hashimoto K, Yano T, Shimizu M, et al. New method for specifying color-rendering properties of light sources based on feeling of contrast[J]. Color Research & Application, 2007, 32(5): 361-371.
- [16] Burkett R. Tm-30 IES method for evaluating light-source color rendition[J]. Architectural Lighting, 2016, 30(6): 22.
- [17] LED. CIE88: 2004 guide for the lighting of road tunnels and underpasses[EB/OL]. (2017-09-14) [2021-06-04]. <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/technology-challenges-in-professional-tunnel-lighting-applications-1>
- [18] Ohno Y. Spectral design considerations for white LED color rendering[J]. Optical Engineering, 2005, 44: 111302.
- [19] Rosenthal S J. Bar-coding biomolecules with fluorescent nanocrystals[J]. Nature Biotechnology, 2001, 19(7): 621-622.
- [20] International Commission on Illumination. Recommended system for mesopic photometry based on visual performance [EB/OL]. [2021-06-04]. <http://www.cie.org.au/CIE%20191-2010.pdf>.
- [21] Gao C, Xu Y, Wang Z F, et al. Improved computation of the adaptation coefficient in the CIE system of mesopic photometry[J]. Optics Express, 2017, 25(15): 18365-18377.
- [22] He G X, Tang J. Spectral optimization of phosphor-coated white LEDs for color rendering and luminous efficacy[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(14): 1450-1453.