

三芯片 LED 光谱效率性能优化研究

姚 其

深圳大学建筑与城市规划学院, 广东 深圳 518061

摘要 三芯片发光二极管(LED)光谱选择性多,整体性能可控性好。通过合成特定色温的多种三芯片LED光源,并研究辐射发光效率(LER),中间视觉效率(MER),生理辐射效率(CER)等性能的变化范围,为光谱优化提供理论基础。从6组在色度图上分布相对均匀的单芯片LED光源光谱中,选择其中3组进行组合,合成2000 K,3000 K,4000 K,5000 K以及6000 K五种色温光源,计算相应的 η_{LER} 、 S/P 值和 a_{cv} 值并进行函数拟合,得到相关性能的范围。结果表明,各色温下相应的 η_{LER} 、 S/P 值和 a_{cv} 值变化范围较大,分别相差达到0.4、0.6以及0.4以上。整体趋势与传统研究结果一致,色温越高, S/P 值和 a_{cv} 值相应越大,但是低色温光源也可达到较高的 S/P 值和 a_{cv} 值,高色温光源也可达到较低的 S/P 值和 a_{cv} 值。三芯片LED光谱优化能够有效的提升整体性能。

关键词 光谱学; 相关色温; 辐射发光效率; 中间视觉效率; 生理辐射效率

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.083003

Spectral Efficiency Performance Optimization Research on Three-Chips of LED

Yao Qi

College of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518061, China

Abstract Three-chips of light emitting diodes (LEDs) are flexible in spectrum composition, and the whole performance is easy to control. Through studying the range of luminous efficacy of radiation (LER), mesopic efficacy of radiation (MER) and circadian efficacy of radiation (CER) based on various combinations of three-chips of LEDs, basic theories for spectrum optimization are provided. Three chips from six groups of single chip LED are chosen, which uniformly distributed on the chromatic diagram to fabricate three-chips of LED at different color temperatures of 2000 K, 3000 K, 4000 K, 5000 K and 6000 K. η_{LER} , S/P ratio and a_{cv} value are calculated, and ranges of corresponding characters are achieved. Results show that ranges of corresponding η_{LER} , S/P ratio and a_{cv} value are large, respectively reach 0.4, 0.6 and over 0.4. Overall trends conform to former studies, high color temperature leads to high S/P ratio and a_{cv} value. But low color temperature LEDs may also reach moderately high S/P ratio and a_{cv} value, and high color temperature LEDs may also reach moderately low S/P ratio and a_{cv} value. Spectrum optimization of three-chips of LEDs effectively helps improving performance.

Key words spectroscopy; correlated color temperature; luminous efficacy of radiation; mesopic efficacy of radiation; circadian efficacy of radiation

OCIS codes 330.1690; 300.6170; 330.1730

1 引言

多芯片发光二极管(LED)发展过程中,其在光谱可选择性,控制灵活性,高效率等方面具有优势。随着控制技术的提升,多芯片LED将更多的应用于功能性照明中,各方面的性能要求也逐渐多样化^[1],而多芯片LED的光谱灵活性也使得其在各方面性能优化方面都具有优势^[2-3]。传统评价体系中对光源的评价更多侧重于光效、显色性、色温(CT)等,而随着中间视觉,非视觉生物效应^[3]的研究,对于效率及舒适性评价,已经不是传统应用的几个参数就能表达了,对于应用场合的变化,其具体评价要求也发生了变化。多芯片LED光谱组成的灵

收稿日期: 2015-01-20; 收到修改稿日期: 2015-04-07; 网络出版日期: 2015-07-21

基金项目: 广东省自然科学基金博士启动基金(S2013040016769)

作者简介: 姚 其(1984—),男,博士,讲师,主要从事视觉与照明,建筑光学,光度学与色度学等方面的研究。

E-mail: yaoqi@szu.edu.cn

活性,对于辐射发光效率(LER),中间视觉效率(MER)以及非视觉生物效应(CER)性能方面的优化更有优势。

LER与光源光效所表达的意思相近,但其更侧重于辐射效率到可视效率转化的概念,其值小于1。一般来说,具有较高LER的LED光源,其光效也相对较高,但各单色光LED自身效率的不同,会使其光效也不同,LER并不能代表光效,对有些光源需要同时计算两个参数,LER性能对应参数 η_{LER} 。中间视觉是指亮度范围在0.005~5 cd/m²的人眼视觉适应状态,其主要适用于道路照明。实际道路照明水平一般在0.1~2 cd/m²范围,对于中间视觉效应的应用可以达到节能效果。经过数十年的研究,不同学者给出了中间视觉模型^[4-6],国际照明委员会(CIE)综合相关研究成果,于2010年给出相关推荐函数模型^[7],使得其应用非常方便。中间视觉水平下,光谱敏感性曲线是由明视觉及暗视觉光谱敏感性曲线共同决定的,是介于明视觉和暗视觉中间的一种视觉状态。对于具体中间视觉亮度,需要通过推荐的函数模型进行计算,而对于一般光源性能评价,要了解光源在中间视觉水平下的表现,只需要计算S/P值或M/P值即可。非视觉生物效应是21世纪发现的新的视觉现象,其基于第三种感光细胞,主要是对人体生理节律的控制^[8-9]。第三种感光细胞是对人体褪黑激素起到抑制作用的一种细胞。随着年龄增长,褪黑激素的分泌将会逐渐降低,进而会影响昼夜节律。而对褪黑激素起到抑制作用的波长主要在短波长范围,因此过多的蓝光将会对人体节律产生影响。对于光源方面,主要是考量CER,即计算参数 a_{cv} 值。非视觉生物效应研究中,Gall等^[10]得到的光谱敏感性曲线C(λ)得到较多认可,也是本文采用的函数曲线。

多芯片LED由于其光谱搭配的灵活性,对于光色、效率性能方面的优化^[11],具有其他类型LED所达不到的优势。研究三芯片LED在LER、MER和CER等性能方面的变化范围,可以提供光源相关性能的理论基础,对于光源光谱的优化提供理论依据。本文以黑体辐射光源作为参考,得到各色温黑体辐射光源对应的LER、MER和CER,通过各种组合的三芯片LED,得到LER、MER和CER的范围。不同光源色温对于各参数的影响,也使得人们在考虑传统效率、舒适度的同时,能够认识到其对于更多应用场合中光源性能所带来的影响,对节能及舒适度的要求能提高到更合理的层面。

2 三芯片LED合成

采用六组单芯片LED,半峰全宽为30 nm,峰值波长分别为红色(R)630 nm,琥珀色(A)580 nm,黄色(Y)560 nm,绿色(G)510 nm,青色(C)480 nm以及蓝色(B)450 nm,其光谱分布如图1(a)所示。各单芯片LED对应的色度坐标如图1(b)所示,合成光源色温分别对应普朗克曲线上的2000 K,3000 K,4000 K,5000 K以及6000 K。三芯片LED合成各种不同色度坐标时,合成公式为

$$\begin{cases} (k_1 l_1 + k_2 l_2 + k_3 l_3)x = l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3 x_3 \\ (k_1 l_1 + k_2 l_2 + k_3 l_3)y = l_1 y_1 + l_2 y_2 + l_3 y_3 \\ k_1 + k_2 + k_3 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中 x, y 为拟合成LED对应的色度坐标, $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$,是三种芯片光谱对应的色度坐标, $l = X + Y + Z$, X, Y, Z 为三刺激值, l_1, l_2, l_3 分别对应三种芯片三刺激值之和, k_1, k_2, k_3 分别对应RGB三种芯片,为待求系数比例。

6组单芯片光源,选择其中3种合成指定色度光源,共可得到 C_6^3 ,即20组三芯片LED光源,去掉合成比例中有负值的组数,可得到RAC、RYC、RYB、RGC、RGB、AYC、AYB、AGC、AGB和ACB共十种组合LED(合成各不同色温时,仍然有负值出现,在各组具体计算时将会去掉)。LER、MER和CER相对应的参数 η_{LER} 、S/P值(或M/P值)以及 a_{cv} 值的计算公式分别对应为

$$\eta_{\text{LER}} = \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda)d\lambda}, \quad (2)$$

$$S/P = \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda)V'(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda)d\lambda}, \quad (3)$$

$$a_{\text{cv}} = \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda)C(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda)d\lambda}, \quad (4)$$

式中 $P(\lambda)$ 为光源光谱能量, $V(\lambda)$ 为明视觉光谱光视效率函数, $V'(\lambda)$ 为暗视觉光谱光视效率函数, $C(\lambda)$ 为非视觉生物效应对应的效率函数,相应的光谱敏感性曲线如图2所示。中间视觉下光谱敏感曲线在各亮度水平下都不相同,其由明视觉和暗视觉光谱敏感性曲线线性组合决定,图2中给出了0.05和0.5 cd/m²亮度水平下对应的曲线。(2)~(4)式可以统一表示为

$$K = \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda)\alpha(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda)\beta(\lambda)d\lambda}, \tag{5}$$

式中 K 分别对应 LER、MER 和 CER 的参数 η_{LER} 、 S/P 值以及 a_{cv} 值, $\alpha(\lambda)$ 分别对应 $V(\lambda)$ 、 $V'(\lambda)$ 以及 $C(\lambda)$, $\beta(\lambda)$ 分别对应单位 1, $V(\lambda)$ 以及 $V(\lambda)$ 。

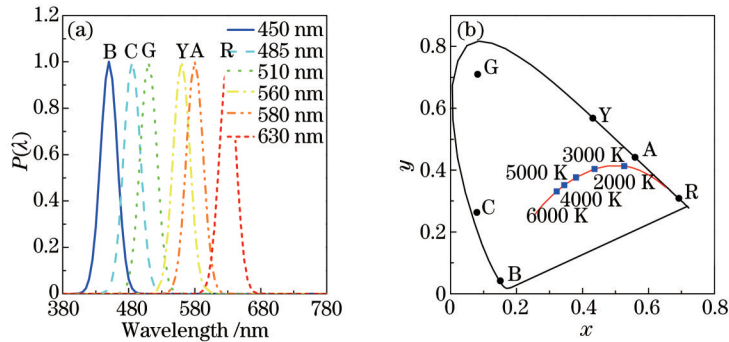


图1 单芯片LED光色特性。(a) 光谱能量分布; (b) 色度坐标

Fig.1 Color characteristics of single chip LED. (a) Spectrum power distribution; (b) chromaticity coordinates

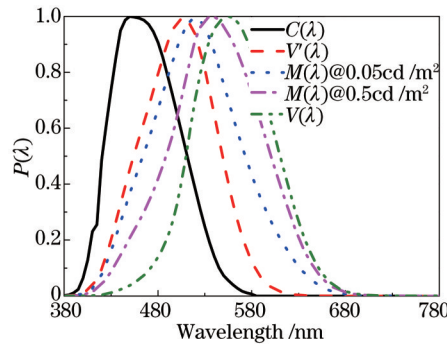


图2 光谱敏感性曲线 $V(\lambda)$ 、 $M(\lambda)$ 、 $V'(\lambda)$ 以及 $C(\lambda)$

Fig.2 Spectral sensitivity curves of $V(\lambda)$, $M(\lambda)$, $V'(\lambda)$ and $C(\lambda)$

3 结 果

3.1 黑体辐射光源对应的性能参数

功能性光源色温范围一般在 2000 K~6000 K 之间,因此选用色温分别为 2000 K、3000 K、4000 K、5000 K 和 6000 K 的黑体辐射光源作为参考光源,其光谱能量分布如图 3 所示,其对应色度坐标如图 1(b)所示。分别计算各黑体辐射光源对应的 LER、MER 和 CER,可得到各性能参数与色温的关系,如图 4 所示。随着色温增加,LER、MER 和 CER 都呈现单调递增趋势,黑体辐射光源相对效率较低,对应的 LER 值低于 0.3,而相应的 MER 和 CER 值也较低。

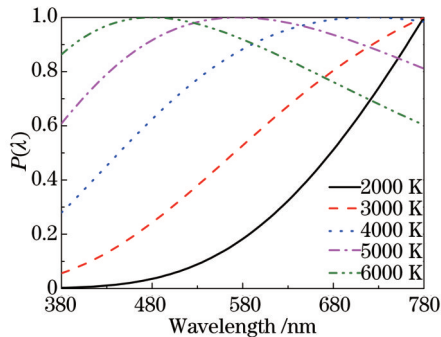


图3 黑体辐射光谱能量分布

Fig.3 Spectrum power distribution of blackbody radiation light sources

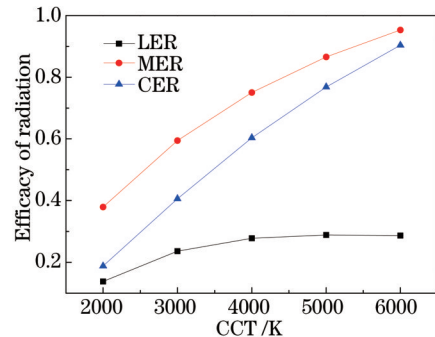


图4 LER、MER 和 CER 随着色温变化关系
Fig.4 LER, MER and CER as a function of CCT

3.2 三芯片LED对应LER、MER和CER计算

单芯片LED合成相应色温的色度坐标,共有RAC、RYC、RYB、RGC、RGB、AYC、AYB、AGC、AGB和ACB这十种组合LED。分别计算不同色温下三芯片组合LED对应的 η_{LER} 值、 S/P 值和 a_{cv} 值,相对应的参数结果如表1所示。图5~7分别表示了 η_{LER} 值、 S/P 值和 a_{cv} 值随着色温的变化关系,在给定的色温时,不同组合三芯片LED对应的 η_{LER} 值、 S/P 值和 a_{cv} 值在较大范围类变化。各色温下, η_{LER} 值变化范围大概在0.4左右;低色温时, S/P 值变化范围相对较小,在0.5左右,高色温时, S/P 值变化范围相对较大,达到1.3以上;低色温时, a_{cv} 值变化范围也相对较小,在0.4左右,高色温时, a_{cv} 值变化范围相对较大,接近1.2。从整体趋势来看,三芯片合成LED对应的LER值随着色温增高而减小, S/P 值随着色温增高而增大, a_{cv} 值随着色温增高而增大。

表1 不同色温下三芯片组合LED对应的 η_{LER} 值、 S/P 值和 a_{cv} 值

Table1 η_{LER} , S/P ratio and a_{cv} of three-chips of LED at different CCT

	2000 K			3000 K			4000 K		
	η_{LER}	S/P	a_{cv}	η_{LER}	S/P	a_{cv}	η_{LER}	S/P	a_{cv}
RAC	0.66922	0.323551	0.178076	/	/	/	/	/	/
RYC	0.471784	0.39753	0.203785	0.456902	0.713432	0.514346	0.401751	1.024417	0.845904
RYB	0.515534	0.288121	0.113034	0.590067	0.401087	0.253154	0.604681	0.487501	0.391793
RGC	0.347847	0.790254	0.438855	0.33648	1.138926	0.776913	0.313183	1.415205	1.095002
RGB	0.348815	0.784626	0.433127	0.354752	1.027117	0.663369	0.348135	1.177862	0.852935
AYC	/	/	/	0.623488	0.632984	0.479038	/	/	/
AYB	0.797381	0.209828	0.087513	0.755726	0.355279	0.23574	0.69956	0.458513	0.379233
AGC	/	/	/	0.616387	0.653189	0.49212	/	/	/
AGB	0.795323	0.213278	0.089884	0.67306	0.529365	0.356351	0.597794	0.71888	0.561651
ACB	0.793377	0.216035	0.092935	/	/	/			
	5000 K			6000 K					
	η_{LER}	S/P	a_{cv}	η_{LER}	S/P	a_{cv}			
RAC	0.428521	1.221364	1.104938	0.363597	1.475749	1.37793			
RYC	0.353124	1.304997	1.15301	AYC	0.316617	1.548798			
RYB	0.597058	0.555529	0.512393	1.423047	AYB	0.583353			
RGC	0.291804	1.639592	1.372292	0.609522	0.612964	AGC			
RGB	0.339167	1.283208	1.006849	0.274639	1.822467	1.606483			
AYC	/	/	/	/	/	/			
AYB	0.652274	0.536604	0.503356	0.615792	0.597185	0.606637			
AGC	/	/	/	/	/	/			
AGB	0.548146	0.847117	0.723221	0.513792	0.939587	0.851288			
ACB	0.472189	1.113457	1.015825	0.442261	1.288421	1.173575			

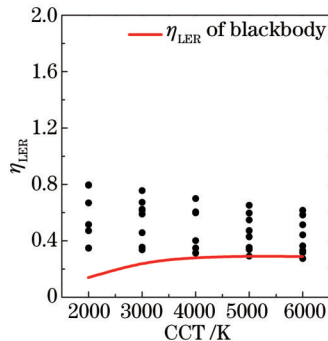


图5 三芯片合成LED对应的 η_{LER} 随色温变化关系

Fig.5 η_{LER} of three-chips LEDs as a function of CCT

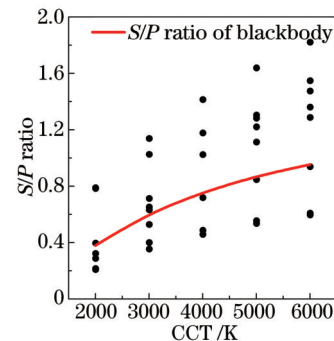


图6 三芯片合成LED对应的 S/P 值随色温变化关系

Fig.6 S/P ratio of three-chips LEDs as a function of CCT

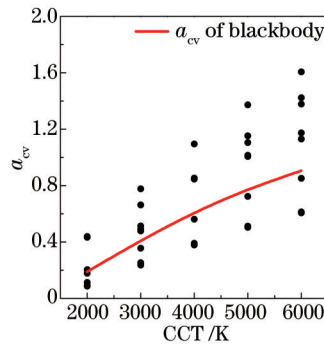


图7 三芯片合成LED对应的 a_{cv} 值随色温变化关系
Fig.7 a_{cv} of three-chips LEDs as a function of CCT

3.3 三芯片LED对应的LER、MER和CER范围界定

依据所合成的三芯片LED计算结果,进行各性能参数范围界定。提取所有三芯片LED计算 η_{LER} 值、 S/P 值、 M/P 值和 a_{cv} 值对应的最小值和最大值,通过线性拟合其与色温的关系,得到各性能参数与色温的函数关系 $f_{(CCT)}$ 。中间视觉亮度下对应的 M/P 值范围带被包含在 S/P 值范围带内,对应的函数关系为 $f_{(CCT)MP} = (1 - m)f_{(CCT)SP} + m$,其中 $m = 0.767 + 0.3334 \log(L)$, L 为中间视觉亮度,这里取0.05和0.5 cd/m^2 两个亮度水平进行计算。经计算,可得到各性能参数对应的兴趣区(ROI),如图8~11所示。图8中 η_{LER} 对应的ROI,在各色温下,范围变化相对较小些,差值在0.4左右,低色温LED对应值相对大一些,高色温相对低一些。但是实际应用中,需要考虑所使用芯片本身对应的效率, η_{LER} 值可以作为光谱合成时的参考,在合成各色温三芯片LED时,尽量选用使得LER相对较大的组合。图9中 S/P 值随着色温整体呈现上升趋势,符合传统研究结果,但是其整体变化范围相当大,在3000 K色温时,最大 S/P 值已经超过1,而在6000 K时已经高达1.8,对于中间视觉下的应用具有很大优势。但是,需注意的是,即使是在高色温的情况下,5000 K或是6000 K时,其最小 S/P 值也是低于0.7,完全不利于中间视觉下的应用。光源要使中间视觉效率高于明视觉效率,其

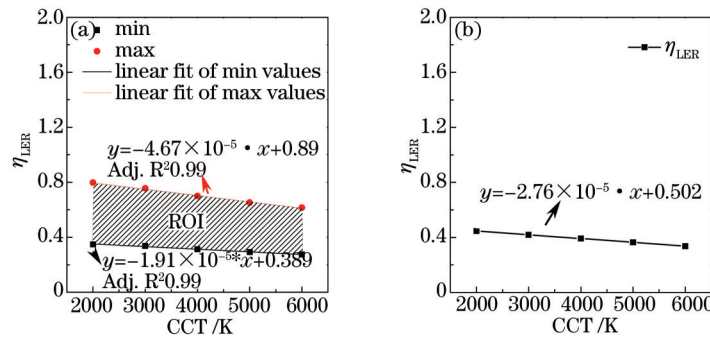


图8 三芯片合成LED对应的 η_{LER} 值。(a)不同色温下最大范围的拟合关系;(b)各色温下最大最小值差值
Fig.8 η_{LER} of three-chips of LEDs. (a) Linear fit of maximum values at different CCT; (b) difference of maximum and minimum at each CCT

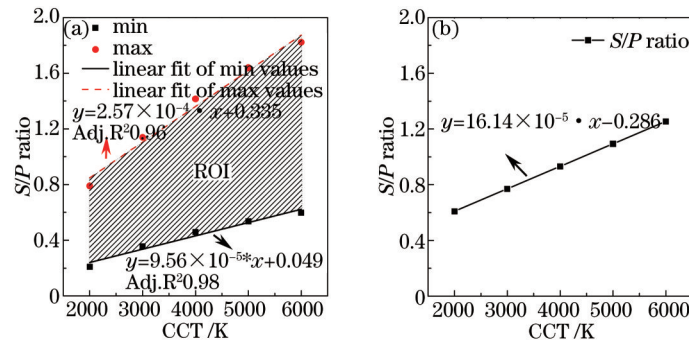


图9 三芯片合成LED对应的 S/P 值。(a)在不同色温下最大范围的拟合关系;(b)各色温下最大最小值差值
Fig.9 S/P ratio of three-chips of LEDs. (a) Linear fit of maximum values at different CCT; (b) difference of maximum and minimum at each CCT

S/P 值需要大于1。因此,在进行三芯片LED光谱搭配时,不仅仅是高色温光源有利于提升中间视觉效率,更重要的是如何去选择、并进行合理优化,才能达到真正的提升效率。图10为中间视觉两个亮度水平 0.5 cd/m^2 和 0.05 cd/m^2 下, M/P 值最大最小值范围,其变化与 S/P 值为线性关系,中间视觉亮度水平越高,其范围相对越小,亮度水平越低,范围越大。图11中 a_{cv} 值同样随着色温整体呈现上升趋势,色温越高时,其对应的值越大。但是通常 a_{cv} 值高的光源会对褪黑激素的产生起到抑制作用,改变人体生理节律,对正常人体不太好,因此, a_{cv} 值相对小一些的光源比较好。图11可以看出各色温下三芯片合成LED对应的 a_{cv} 值变化范围很大,2000 K色温时最低值小于0.1,即使在最高色温时,通过选择合适的芯片进行光谱组成,其值也可以控制在最低0.5左右,而不进行控制优化,色温即使在3000 K左右, a_{cv} 值也可以超过1。

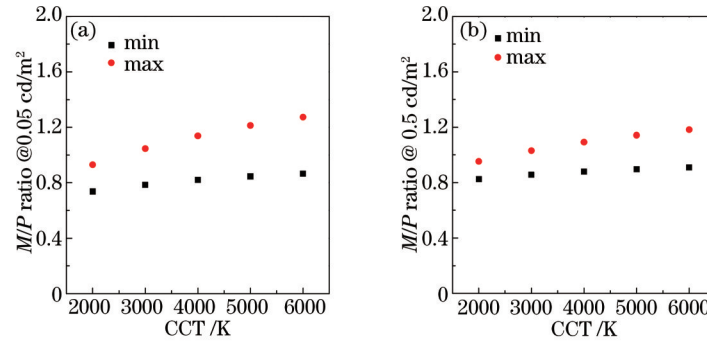


图10 三芯片合成LED对应的 M/P 值。(a)亮度水平 0.05 cd/m^2 ;(b)亮度水平 0.5 cd/m^2

Fig.10 M/P ratio of three-chips of LEDs. (a) Luminance level 0.05 cd/m^2 ; (b) luminance level 0.5 cd/m^2

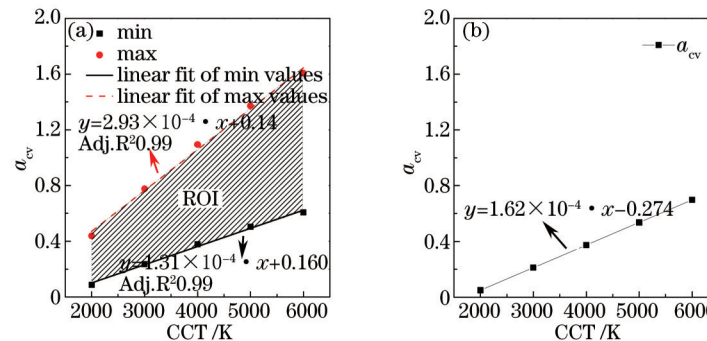


图11 三芯片合成LED对应的 a_{cv} 值。(a)不同色温下最大范围的拟合关系;(b)各色温下最大最小值差值

Fig.11 a_{cv} of three-chips of LEDs. (a) Linear fit of maximum values at different CCT; (b) difference of maximum and minimum at each CCT

4 结 论

三芯片合成LED光谱组合的改变,可以直接影响相关性能的变化,依据研究结果,可以得到以下结论。

1) 单芯片LED合成不同色温三芯片LED,在各色温下不同三芯片组合LED对应的LER、MER、CER参数具有较宽的范围;

2) 各色温合成三芯片LED对应的LER、MER、CER参数范围,通过线性拟合,可以线性确定其ROI区域;

3) 各色温合成三芯片LED对应的LER随着色温整体呈单调递减趋势,MER随着色温整体呈单调递增趋势,CER随着色温整体呈单调递增趋势;

4) 各色温下不同三芯片组合LED对应的MER参数在不同色温下,其范围最大值和最小值相差0.6以上,使得低色温光源也可以设计出较高的 S/P 值适合中间视觉的应用;反之高色温光源如果不进行合理的光谱优化也不能达到良好的中间视觉效率;

5) 各色温下不同三芯片组合LED对应的CER参数在不同色温下,其范围最大值和最小值相差0.4以上,对于低色温光源,可以使得 a_{cv} 值很小,高色温光源也可以通过优化使之减小,降低对人体生理节律可能产生的不良影响。

选用了6种单芯片,尽量做到了均匀分布,因此各色温下所有可合成的三芯片LED组合基本涵盖了可

能的LED组合,对应的各性能参数范围适用于实际使用的三芯片LED,作为三芯片LED光谱合成的参考。尽可能得到合成不同色温的各种组合三芯片LED对应的LER、MER、CER参数最大范围,而对于传统光源光效、显色性等参数没有具体分析。因此在合成光谱时,参考光源LER、MER、CER参数时,同时要依据实际功能性照明需求,考虑光效、显色性参数,进行综合优化。LER是表现从辐射度量转换到光度量的参数,其值越高,对于光源相对越好,但是LER并不代表光效,由于各单芯片LED特性不同,因此光效也会受到影响。LER的计算对于光谱优化起到了很好的作用,但是具体优化时仍然需要计算具体光效以辅助优化。对于光源在中间视觉下的应用,只需要参考光源对应的 S/P 值即可,中间视觉下不同亮度时修正系数也各不相同,其具体范围要小于对应的 S/P 值范围,但是其与相应光源 S/P 值是呈线性关系的,在应用时可以根据中间视觉公式进行换算即可。对于CER,光源中蓝光波长部分所占比例决定了 a_{cv} 值的大小,相对低色温光源对于 a_{cv} 值的控制更有优势,但是即使较高色温光源,通过光谱的优化配置,仍然可以达到非常低的 a_{cv} 值。

参考文献

- 1 Ou H, Corell D, Ou Y, *et al.*. Spectral design flexibility of LED brings better life[C]. SPIE, 2012, 8278: 827802.
- 2 Yao Qi, Gu Beibei. Effective reflection luminance of object under light source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 033002.
姚 其, 顾蓓蓓. 光源照射下物体有效反射亮度[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 033002.
- 3 Žukauskas A, Vaicekuskas R, Vitta P. Optimization of solid-state lamps for photobiologically friendly mesopic lighting [J]. Appl Opt, 2012, 51(35): 8423–8432.
- 4 Berman S, Clear R. Additivity constraints and visual task considerations in mesopic photometry[J]. J Illum Eng Soc, 2001, 30(1): 90–104.
- 5 Sagawa K, Takeichi K. Mesopic spectral luminous efficiency functions: Final experimental report[J]. J Light & Visual Environment, 1987, 11(1): 22–29.
- 6 Eloholma M, Halonen L. Performance based model for mesopic photometry[J]. Helsinki, Finland, Helsinki University of Technology, 2005.
- 7 CIE. Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance[S]. Vienna: CIE Central Bureau. 2010.
- 8 Thapan K, Arendt J, Skene D J. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans[J]. J physiology, 2001, 535(1): 261–267.
- 9 Brainard G C, Hanifin J P, Greeson J M, *et al.*. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor[J]. The J Neuroscience, 2001, 21(16): 6405 – 6412.
- 10 Gall D, Bieske K. Definition and measurement of circadian radiometric quantities[C]. Proceedings of the CIE Symposium' 04 on Light and Health. 2004: 129–132.
- 11 Schubert E F, Kim J K. Solid-state light sources getting smart[J]. Science, 2005, 308(5726): 1274–1278.

栏目编辑: 苏 岑