

R/G/B/W 4 色 LED 光源不舒适眩光研究

田会娟^{1,3*}, 郝甜甜^{2,3}, 关涛^{1,3}, 胡阳^{2,3}, 蔡敏鹏^{1,3}, 张辉^{1,3}

¹天津工业大学电气工程与自动化学院, 天津市电工电能新技术重点实验室, 天津 300387;

²天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387;

³大功率半导体照明应用系统教育部工程研究中心, 天津 300387

摘要 对不同光谱分布的发光二极管(LED)引起的不舒适眩光进行了研究。设计开发了红/绿/蓝/白(R/G/B/W)4色LED光源模块,研究了该模块在3种不同背景亮度下的眩光效应,并在每种条件下进行了7等级量表主观评价。实验结果表明:在3种不同背景亮度下,R/G/B/W 4色LED光源产生了不同程度的眩光。在同一背景亮度下,LED亮度越大,主观实验评分越高,即产生更多的不舒适眩光。同时研究发现,B-LED光源不舒适眩光最强,W-LED光源不舒适眩光最弱,验证了统一眩光指数(R_{UGR})模型对该4色LED光源的适用性。B-LED光源 R_{UGR} 计算值与主观实验不舒适眩光评分的相关性最差,W-LED光源在背景亮度 $L_b = 19.967 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 时其相关性最好($R^2 = 0.951$)。

关键词 光学器件; 发光二极管; 不舒适眩光; 光谱功率分布; 统一眩光指数

中图分类号 TN206

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.132301

Discomfort Glare Caused by R/G/B/W Four-Color Light Emitting Diode Sources

Tian Huijuan^{1,3*}, Hao Tiantian^{2,3}, Guan Tao^{1,3}, Hu Yang^{2,3}, Cai Minpeng^{1,3}, Zhang Hui^{1,3}

¹Tianjin Key Laboratory of Advanced Electrical Energy Technology, School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

²School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

³Engineering Research Center of High Power Solid State Lighting Application System, Ministry of Education, Tianjin 300387, China

Abstract In this study, the discomfort glare caused by light emitting diode (LED) modules with different spectral power distributions is investigated. Further, red/green/blue/white (R/G/B/W) four-color LED source modules are designed and developed. The glare effect of the modules is determined for three different background luminances. Subject assessment of each condition is provided according to a seven-level scale. Results show that different glare effects are caused by the R/G/B/W four-color LED sources for three different background luminance. A high subjective rating score is obtained at a large luminance of the four modules within the same background luminance, causing more discomfort glare. Simultaneously, the largest glare is caused by B-LED source, whereas the smallest glare is caused by W-LED source in those modules. The unified glare rating (R_{UGR}) model is used to experimentally verify the applicability of four-color LED source modules. Results show that the correlation between calculated value of R_{UGR} and subjective discomfort glare rating score of the B-LED source is the worst, whereas the W-LED source has the best correlation ($R^2 = 0.951$) when the background luminance L_b is $19.967 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$.

Key words optical devices; lighting emitting diode; discomfort glare; spectral power distribution; unified glare rating

OCIS codes 230.3670; 230.0250; 330.7326; 220.4840; 330.4595

收稿日期: 2019-01-09; 修回日期: 2019-01-22; 录用日期: 2019-01-30

基金项目: 国家自然科学基金(61504095)、天津市高等学校创新团队培养计划(TD13-5035)、天津市教委科研计划(自然科学基金)(2017ZD06)

* E-mail: tianhjgx@126.com

1 引言

发光二极管(LED)以其发光效率高、寿命长、光谱功率分布窄、光色可调、节能环保等优点,在室内外照明、景观照明、背光、显示、可见光通信等领域得到广泛应用^[1-5]。然而,LED照明的一个主要问题是眩光效应,同时,LED光源亮度分布的均匀性和光谱功率分布是影响眩光感知的两个重要因素^[6-12]。

Yang等^[6-7]研究表明亮度分布不均匀的LED光源比亮度分布均匀的LED光源产生更多的眩光,且计算得到的统一眩光评价指数(R_{UGR})与眩光评分间的相关系数为0.64。此外,许多研究表明,不同的光谱功率分布对眩光感具有不同的影响^[8-12]。Flannagan等^[8]比较了峰值波长在480~650 nm之间的6种光源引起的不舒适眩光,结果表明,峰值波长为577 nm的光源产生的眩光感最弱,在相同亮度下峰值波长为480 nm的光源产生的眩光感最强。Flannagan^[9]进一步研究了卤素前照灯和氙气灯产生的不舒适眩光,结果表明,氙气灯因含有的蓝光成分较多而产生了更多不舒适眩光。Bullough等^[10]研究了暗视觉和明视觉效率函数的光输出比分别为1.67, 1.62, 2.0的氙气灯、卤素灯和加装蓝光滤色片的卤素灯引起的眩光,结果表明,氙气灯产生的眩光最强,其次是加装蓝光滤色片的卤素灯,最后是卤素灯。Kimura-Minoda等^[11]研究了7种LED光源产生的不舒适眩光,其中包括6种不同光色的LED(峰值波长的范围为459~628 nm)和1种由蓝光激发荧光粉合成白光的LED(相关色温为6800 K),结果表明,蓝光LED比红光、绿光和白光LED产生的不舒适眩光更强,且除了蓝光LED之外,在同一个亮度等级下其他LED均会产生类似的眩光感。Yang等^[12]对具有不同光谱分布的LED光源引起的不舒适眩光进行了实验验证。结果表明,彩光LED比白光LED产生更多的不舒适眩光,且蓝光LED具有最强的眩光效应。

本文在3种不同背景亮度下采用7等级量表主观评价研究了多基色R/G/B/W 4色LED光源模块对视觉舒适度的影响,并与统一眩光指数 R_{UGR} 的计算结果进行比较。

2 统一眩光评价模型

统一眩光评价指数 R_{UGR} 是室内照明不舒适眩光评价的主要方法之一^[13-14],其公式为

$$R_{UGR} = 8 \lg \frac{0.25}{L_b} \sum_{i=1}^n \frac{L_{a,i}^2 \omega_i}{P_i^2} \quad (1)$$

式中: $L_{a,i}$ 为眩光源亮度($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$); L_b 为背景亮度($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$); ω_i 为眩光源与观察者眼睛位置所成立体角(sr); P_i 为眩光源位置指数; i 为眩光源的数量。如图1所示,统一眩光评价指数 R_{UGR} 主要取决于观察者对当前照明环境直观的视觉感受,表1^[15]为 R_{UGR} 不舒适眩光的评价表。

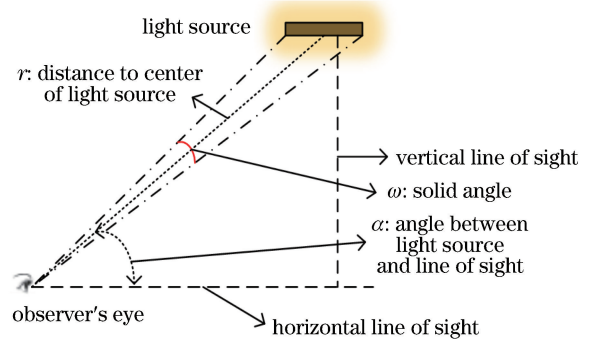


图1 统一眩光评价指数 R_{UGR} 参数图

Fig. 1 Parameters of unified glare rating R_{UGR}

表1 R_{UGR} 不舒适眩光评价表

Table 1 Discomfort glare evaluated using R_{UGR}

R_{UGR}	Discomfort glare criterion
10	Imperceptible
13	Just perceptible
16	Perceptible
19	Just acceptable
22	Unacceptable
25	Just uncomfortable
28	Uncomfortable
31	Just intolerable
34	Intolerable

3 实验与测试

为减少杂散光影响并提高测试精度,本次实验在暗室中进行,采用标准白炽灯(功率 $P = 300 \text{ W}$,相关色温 $T_c = 2701 \text{ K}$)作为环境照明光源。图2(a)为实拍图,图2(b)为整个实验装置示意图,被试者距离眩光源R/G/B/W 4色LED模块的水平距离为3 m,该LED模块固定在一支架上,为提高混光均匀性,在模块前增加一个遮光板。

通过调节标准白炽灯与被试者间的水平距离来实现背景亮度的改变,实验设置了3种不同的背景亮度:45.833, 19.967, 11.750 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在此过程中,被试者需要观看一个PDF文件,被试者与显示器之间的距离为60 cm,显示器的中心与被试者的眼睛在同一水平面上。

实验采用R/G/B/W LED的眩光源模块由8颗

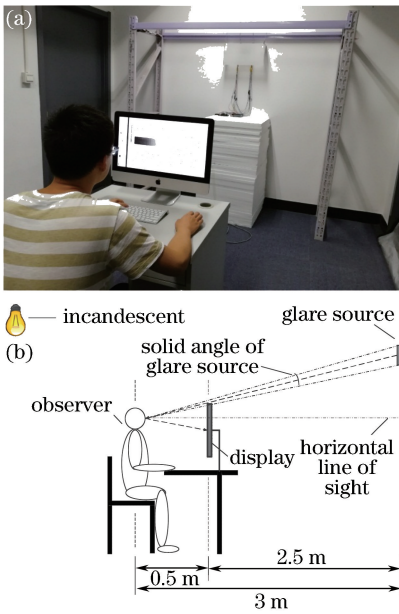


图2 实验平台。(a)实验实拍图;(b)实验装置示意图
Fig. 2 Experimental platform. (a) Experimental photo; (b) diagram of experimental setup

LED组成,同一种颜色的LED灯珠串联,4种类型灯珠并联,焊接在铝基板上,为缓解结温引起的色漂移和出光效率降低等问题,实验中将铝基板用导热胶固定在散热器上,以减小由结温变化造成的误差^[16-17]。采用光谱分析系统(HASS-2000,远方光电,杭州,中国)测量各色LED在满电流工作状态下色度学参数及相对光谱功率分布,其中白光LED的相关色温为 $T_c = 7208\text{ K}$,显色指数为 $R_a = 76$,红光LED的峰值波长为628 nm,绿光LED的峰值波长为517 nm,蓝光LED的峰值波长为452 nm,各LED光源的色坐标 (x, y) 、光通量及功率如表2和图3所示。

表2 实验中R/G/B/W LED模块参数

Table 2 Parameters of R/G/B/W LED modules in experiment

LED	x	y	Luminous flux /lm	Power /W
W-LED	0.304	0.312	407.160	4.356
R-LED	0.686	0.314	209.060	4.157
G-LED	0.169	0.687	224.780	5.445
B-LED	0.151	0.031	53.062	3.710

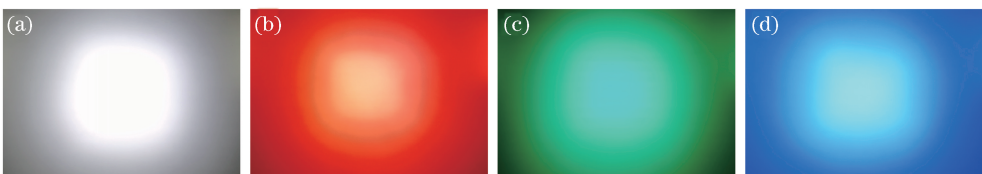


图5 4色LED光源模块。(a) W-LED;(b) R-LED;(c) G-LED;(d) W-LED
Fig. 5 Four-color LED source modules. (a) W-LED; (b) R-LED; (c) G-LED; (d) B-LED

驱动电路主要由直流稳压电源、WiFi模块、STM32-ARM模块、R/G/B/W 4色LED光源模块组成,如图4所示。直流稳压(DC)电源将交流电转换为电压为8~24 V的直流电;WiFi模块接收客户端的调光控制信号并将该信号反馈到STM32-ARM模块;通过输入不同的占空比来控制R/G/B/W LED光源各模块的光通量,从而实现对亮度的控制。为减小频闪的影响,PWM调光频率设置为1000 Hz,周期为 $1/1000\text{ s} = 1\text{ ms}$ 。根据该R/G/B/W 4色LED光源模块的光谱功率分布,将该模块分成4种眩光源,即W-LED、R-LED、G-LED和B-LED,如图5所示。

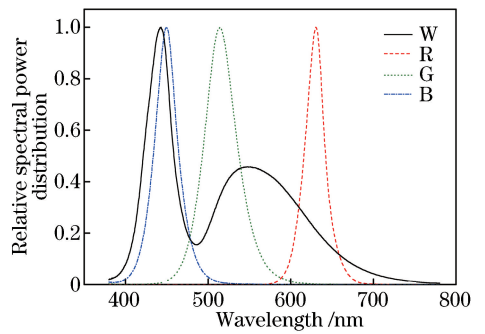


图3 R/G/B/W LED模块的相对光谱功率分布
Fig. 3 Relative spectral power distributions of R/G/B/W LED modules

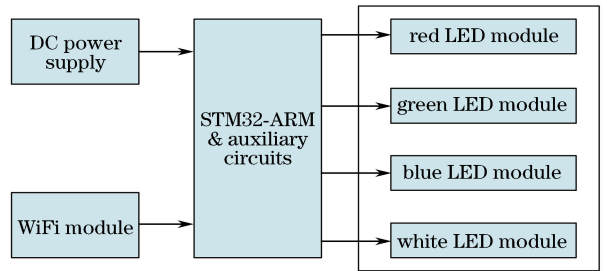


图4 R/G/B/W LED光源模块驱动电路原理图
Fig. 4 Principle of driving circuit for R/G/B/W LED source modules

实验设置了4种眩光源在10种亮度等级下的亮度值(见表3和表4),采用光谱辐射度计(PR670, PhotoResearch, 美国)对每种眩光源的亮度和背景

表3 实验条件

Table 3 Experimental conditions

Item	Light source			
	W-LED	R-LED	G-LED	B-LED
Luminance level	10			
Background luminance / ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	45.833, 19.967, 11.750			
Observer	10			
Total number of ratings	1200			

表4 4组LED光源在不同亮度等级下的亮度

Table 4 Luminances of four LED sources at different luminance levels

Luminance level	W-LED / ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	R-LED / ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	G-LED / ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	B-LED / ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)
1	380.760	250.720	350.220	34.268
2	823.280	514.820	739.500	72.082
3	1242.600	768.100	1115.400	108.060
4	1684.400	1026.160	1507.600	146.120
5	2100.200	1271.400	1869.000	183.680
6	2543.200	1520.400	2260.800	222.140
7	2958.600	1753.800	2628.600	258.080
8	3409.000	1985.800	3035.400	295.120
9	3852.400	2207.400	3425.400	334.460
10	4335.000	2438.000	3839.400	342.800

亮度进行测量,光谱辐射计与被试者眼部位置保持一致,为减小测试过程的误差,对每种眩光源的亮度和背景亮度进行5次测量,取其均值。

10名被试者在3种背景亮度10种亮度等级情况下对这4种眩光模块进行了不舒适眩光评价,眩光评定量表^[18-19]如表5所示。被试者的年龄在20~30岁之间,其中包括5名男性和5名女性,且均为在校学生,被试者身体健康,双眼矫正后视力正常,

均不存在色盲、色弱,无眼部疾病等,且在实验期间不允许被测试者摄入含咖啡因与酒精的饮品食物。

在实验过程中,被试者首先在不同的光环境情况适应10 min,然后在一个亮度等级下点亮一种眩光源3 s,被试者在此期间按照表5给出相应的评分,之后更换下一个亮度等级,直到10个亮度等级更换完毕,在每次更换亮度等级期间,被试者观看1 min的PDF文件,共计1200次评分。

4 实验结果与分析

从图6可以看出,在3种背景亮度下W-LED、R-LED、G-LED、B-LED 4个眩光源亮度与实验结果主观评价具有如下关系:1)对于W-LED光源,背景亮度 L_b 最大时其主观评分最小,而 L_b 最小时,主观评分不一定最大,当眩光源亮度小于 $2100.2 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,背景亮度越大,主观评分越小;2)对于R-LED光源,眩光源亮度相同时,背景亮度 L_b 越大,主观评分越小;3)对于G-LED光源,背景亮度 L_b 最大时其主观评分最小;4)对于B-LED光源与W-LED的变化趋势基本一致,在亮度小于 $258.08 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,眩光源亮度不变时,背景亮度越大,主观评分越小。由上述分析可知,在同一背景亮度下,随着眩光源亮度的增加其眩光感增强,且背景亮度不同对于不同光色LED的眩光感的影响也不同。同时,由实验结果可以看出,B-LED的眩光感最强,如图6(d)所示。此外,在3种背景亮度 $L_b = 45.833, 19.967, 11.750 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 下,不同眩光源亮度与被试者主观评分数据拟合的线性方程的相关系数 R^2 均大于0.960(W-LED: $R^2 = 0.992, 0.977, 0.993$ 。R-LED: $R^2 = 0.989, 0.990, 0.993$ 。G-LED: $R^2 = 0.962, 0.992, 0.977$ 。B-LED: $R^2 = 0.975, 0.979, 0.985$),线性拟合度较高。

表5 眩光评定量表

Table 5 Glare rating scale

Category	Semantic criteria	Description of reaction glare
1	Imperceptible	I am not aware of anything
2	Just perceptible	I am aware there is something but cannot tell what it is
3	Noticeable	I am aware of the presence of the luminaire but it does not bother me
4	Just uncomfortable	I am aware of a luminaire and I wish it was not there
5	Uncomfortable	I am aware of a luminaire and I would complain to my supervisor about it
6	Just intolerable	I am aware of a luminaire, and if somebody does not do something about it, I will take direct action myself
7	Intolerable	I am aware of a luminaire and I will not stay here a moment longer if somebody does not do something about it, now

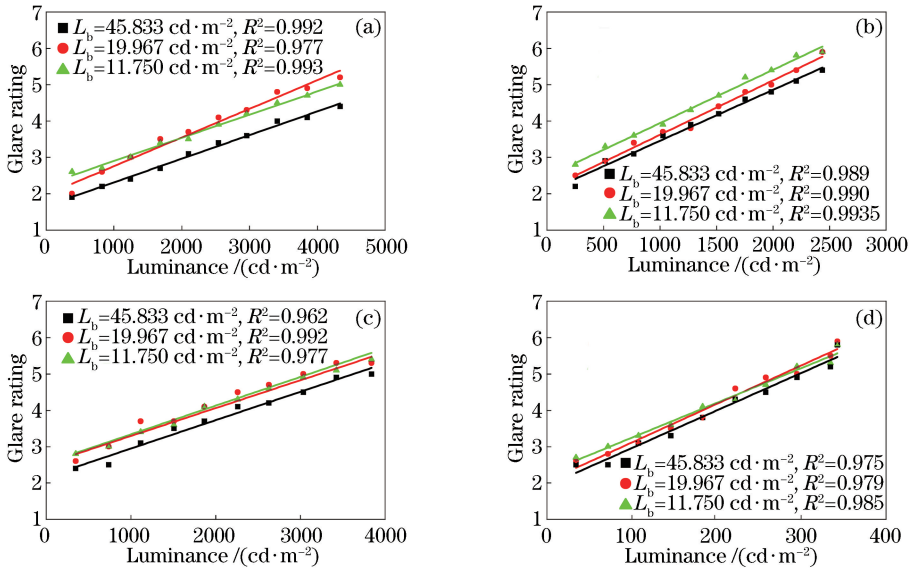


图6 在3种不同背景亮度下,4种LED眩光源亮度与实验结果主观评价关系。

(a) W-LED; (b) R-LED; (c) G-LED; (d) B-LED

Fig. 6 Relationship between luminance and subjective evaluations of experimental results of four LED glare sources in three different background luminances. (a) W-LED; (b) R-LED; (c) G-LED; (d) B-LED

为进一步分析这4种眩光源的眩光影响,基于图6中不同亮度背景下B-LED的10个数据点,采用线性插值的方法找出W-LED、R-LED、G-LED这3种眩光源亮度与B-LED相等时的实验结果主观评价关系,如图7所示。从图中可以看出,当眩光源亮度值在 $[0, 350]$ 之间时,B-LED的眩光感最强,W-LED的眩光感最弱。当背景亮度为 $45.833 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,W-LED的眩光评分在 $[1.665, 1.874]$ 之间,在该亮度区间内其眩光感变化不大;R-LED的眩光评分在 $[1.626, 2.444]$ 之间,在该亮度区间内随着亮度的增加眩光感增强;G-LED的眩光评分在 $[2.319, 2.398]$ 之间,在该亮度区间内其眩光感变化不大;B-LED的眩光评分在

$[2.500, 5.800]$ 之间,在该亮度区间内随着亮度的增加眩光感增强。当背景亮度为 $19.967 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,R-LED的眩光评分在 $[2.172, 2.639]$ 之间,在该亮度区间内其眩光感变化不大;W-LED和G-LED的眩光评分与背景亮度为 $45.833 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 时的结果基本相同;B-LED的眩光评分在 $[2.600, 5.900]$ 之间,在该亮度区间内随着亮度的增加眩光感增强。当背景亮度为 $11.750 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,W-LED、R-LED和G-LED三种眩光源的眩光评分基本相同,在 $[2.390, 2.974]$ 之间,在该亮度区间内这3种光源的眩光感变化不大;B-LED的眩光评分在 $[2.700, 5.800]$ 之间,在该亮度区间内随着亮度的增加眩光感增强。

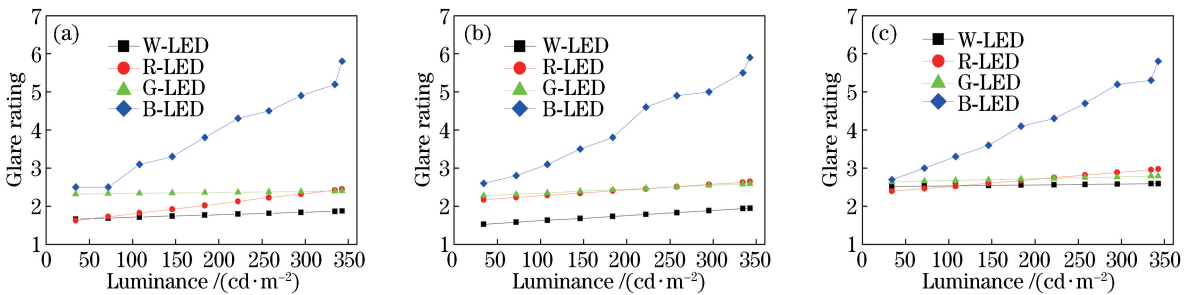


图7 三种不同背景亮度下线性插值后的4种LED眩光源亮度与实验结果的主观评价关系。(a) $L_b=45.833 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$; (b) $L_b=19.967 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$; (c) $L_b=11.750 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$

Fig. 7 Relationship between luminance and subjective evaluations of experimental results of four LED glare sources after linear interpolation in three different background luminances. (a) $L_b=45.833 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$; (b) $L_b=19.967 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$; (c) $L_b=11.750 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$

通过(1)式可计算上述 3 种背景亮度下 4 种眩光源的 R_{UGR} 值。图 8 为 4 种眩光源 W-LED、R-LED、G-LED 和 B-LED 的 R_{UGR} 值与实验结果的主观评价关系,当背景亮度为 $L_b = 45.833, 19.967, 11.750 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,4 种眩光源的 R_{UGR} 计算值与主观评价的最大相关系数 (R^2) 存在如下关系:在

$L_b = 45.833 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,R-LED 光源的相关系数较高, $R^2 = 0.938$; 在 $L_b = 19.967 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,W-LED 光源的相关系数最高, $R^2 = 0.951$; 在 $L_b = 11.750 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,R-LED 光源的相关系数最高, $R^2 = 0.899$ 。在这 3 种背景亮度下,B-LED 的相关系数最低。

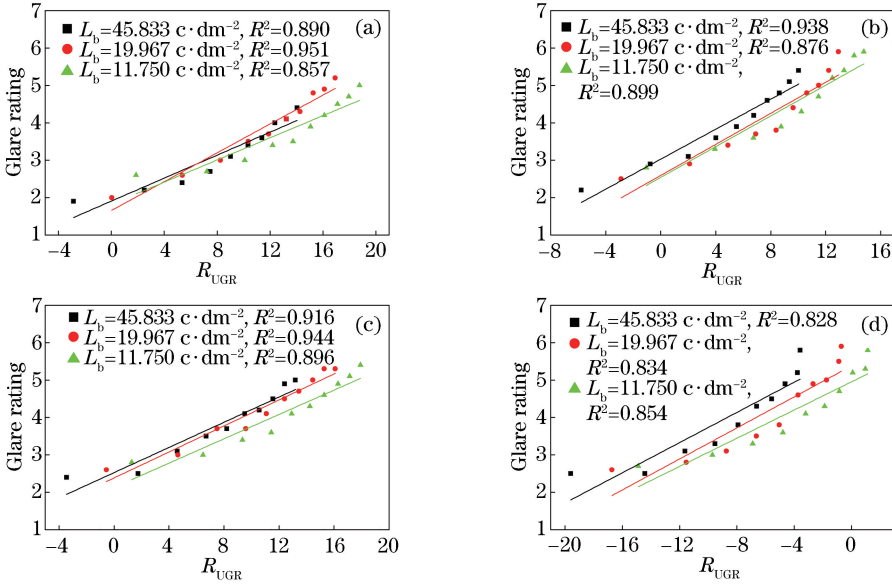


图 8 4 种 LED 光源的 R_{UGR} 值与实验结果的主观评价关系。(a) W-LED;(b) R-LED;(c) G-LED;(d) B-LED
 Fig. 8 Relationship between R_{UGR} value and subjective evaluations of experimental results for four LED glare sources. (a) W-LED; (b) R-LED; (c) G-LED; (d) B-LED

5 结 论

设计开发了 R/G/B/W 4 色 LED 光源模块,并在 3 种不同背景亮度下对该 4 色光源引起的不舒适眩光进行了系统研究,采用 7 等级量表的主观评价进行实验验证。实验结果表明:在 3 种不同背景亮度下 R/G/B/W 4 色 LED 光源产生的眩光影响不同。在同一背景亮度下,LED 亮度越大,产生的不舒适眩光越多。同时发现,B-LED 光源产生的不舒适眩光最强,W-LED 光源产生的不舒适眩光最弱。同时验证了统一眩光指数 R_{UGR} 模型对该 4 色 LED 光源的适用性,结果表明,在背景亮度 $L_b = 45.833, 19.967, 11.750 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,B-LED 光源 R_{UGR} 计算值与主观实验不舒适眩光评分的相关性最差,其相关系数分别为 $R^2 = 0.828, 0.834, 0.854$;G-LED 光源相关性较高, $R^2 = 0.916, 0.944, 0.896$;R-LED 光源和 W-LED 光源次之,分别为 $R^2 = 0.938, 0.876, 0.899$ 和 $R^2 = 0.890, 0.951, 0.857$ 。在背景亮度 $L_b = 19.967 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 时 W-LED 光源相关性最好, $R^2 = 0.951$ 。本研究为健康、舒适的室内照明提供一定的

数据支持和理论基础。后续的工作需进一步增加在主观评价和客观测试实验中获得的训练样本数目、增加不同年龄阶段被试者的研究数据以及个体差异的数据分析。同时,研究发现,R/G/B/W 4 色 LED 光源模块的 R_{UGR} 值与主观评价的相关性较低,后续需构建更为准确的不同光色 LED 眩光模型,提高其眩光评价性能,为建立更为完善、准确度更高的眩光测试系统提供基础。

参 考 文 献

- [1] Pulli T, Dönsberg T, Poikonen T, *et al.* Advantages of white LED lamps and new detector technology in photometry[J]. Light Science & Applications, 2015, 4(9): e332.
- [2] Wang Y G, Huang X X, Tao L, *et al.* 45-Gb/s RGB-LED based WDM visible light communication system employing CAP modulation and RLS based adaptive equalization[J]. Optics Express, 2015, 23(10): 13626-13633.
- [3] Xu M S, Zhang H X, Zhou Q B, *et al.* Effects of spectral parameters on the light properties of red-

- green-blue white light-emitting diodes [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(16): 4456-4460.
- [4] Lee A T L, Chen H T, Tan S C, *et al.* Precise dimming and color control of LED systems based on color mixing [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(1): 65-80.
- [5] Feng A Y, Li L, Zhou L, *et al.* Validation and optimization of discomfort glare model for white LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0733001.
冯阿阳, 李乐, 周莉, 等. 白光 LED 不舒适眩光模型的验证和优化 [J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0733001.
- [6] Yang Y, Luo R M, Ma S N, *et al.* Assessing glare. Part 1: comparing uniform and non-uniform LED luminaires [J]. *Lighting Research & Technology*, 2017, 49(2): 195-210.
- [7] Yang Y, Luo M R, Ma S. Assessing glare. Part 2: modifying unified glare rating for uniform and non-uniform LED luminaires [J]. *Lighting Research & Technology*, 2017, 49(6): 727-742.
- [8] Flanagan M J, Sivak M, Ensing M, *et al.* Effect of wavelength on discomfort glare from monochromatic sources: UMTRI-1989-3 [R]. USA: The University of Michigan Transportation Research Institute, 1989: 1-20.
- [9] Flanagan M J. Subjective and objective aspects of headlamp glare: effects of size and spectral power distribution: UMTRI-1999-36 [R]. USA: The University of Michigan Transportation Research Institute, 1999: 1-14.
- [10] Bullough J, Derlofske J V, Fu Z. Discomfort and disability glare from halogen and HID headlamp systems [J]. *SAE Technical Paper*, 2002: 1-4.
- [11] Kimura-Minoda T, Ayama M. Evaluation of discomfort glare from color leds and its correlation with individual variations in brightness sensitivity [J]. *Color Research & Application*, 2011, 36(4): 286-294.
- [12] Yang Y, Luo R M, Huang W. Assessing glare, Part 3: glare sources having different colours [J]. *Lighting Research & Technology*, 2018, 50(4): 596-615.
- [13] Bedocs L, Einhorn H D, Fischer D, *et al.* Discomfort glare in interior lighting [R/OL]. Vienna: International Commission on Illuminating, 1995: CIE 117-1995 [2019-01-01]. <http://www.cie.co.at/publications/discomfort-glare-interior-lighting>.
- [14] Tian H J, Hong Z, Hao T T, *et al.* Method for glare measurement based on a digital camera image in interior lighting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(2): 022201.
田会娟, 洪振, 郝甜甜, 等. 基于数码相机图像的室内照明眩光测量方法研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(2): 022201.
- [15] Cai H, Chung T. Evaluating discomfort glare from non-uniform electric light sources [J]. *Lighting Research & Technology*, 2013, 45(3): 267-294.
- [16] Tian H J, Liu J X, Hong Z, *et al.* Dimming method for R/G/B/WW light emitting diode based on four channels' pulse width modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0423002.
田会娟, 柳建新, 洪振, 等. 基于脉冲宽度调制的 R/G/B/WW 4 色发光二极管调光调色方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0423002.
- [17] Song P C, Wen S S, Chen Y C. 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.
- [18] Boyce P R, Hunter C M, Inclin C. Overhead glare and visual discomfort [J]. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 2003, 32(1): 73-88.
- [19] de Boer J B, Schreuder D A. Glare as a criterion for quality in street lighting [J]. *Lighting Research and Technology*, 1967, 32(2 IEStrans): 117-135.